IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."
— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."
— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS-Martin Gardner

SALVAT

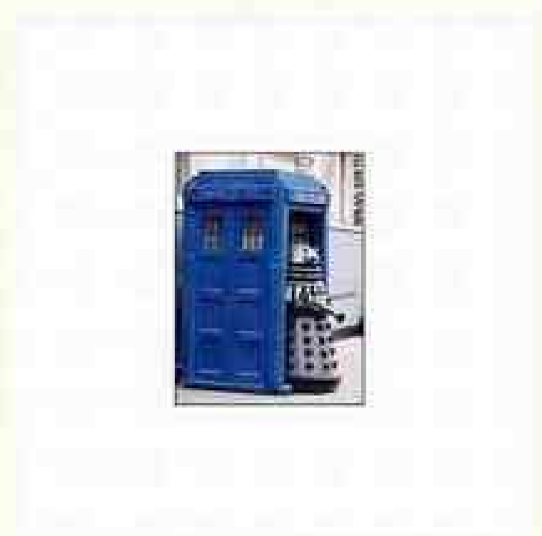
MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT



MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana
The Ambidextrous Universe publicada por Charles Scribner's Sons
de Nueva York

A MI SOBRINO, THEODORE GARDNER WEAVER

ISBN 0-684-15789-6 Edición original
ISBN 84-345-8246-5 Versión española
ISBN 84-345-8387-9
Depósito Legal NA-1303-85
Publicada por Salvat Editores, S.A. - Mallorca, 41-49 - Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

Prefacio a la primera edición

«El año 1957 fue quizá uno de los años más apasionantes de la historia de la física nuclear», escribió D. Y. Bugg en la recensión de un libro sobre la degradación beta, en *The New Scientist*, el 16 de agosto de 1962. "A comienzos de ese año se propagó como un relámpago, de laboratorio en laboratorio, la noticia de que la paridad no se conserva. Los profesores agitaron sus brazos y hablaron entusiasmados sobre *spin*, sobre espejos y antimundos, e incluso los estudiantes se dieron cuenta de que algo notable estaba en marcha".

Mucha gente sin especiales conocimientos científicos advirtió también que algo extraordinario había ocurrido, en particular cuando dos físicos chino-americanos, Tsung Dao Lee y Chen Ning Yang, recibieron el premio Nobel de Física por los trabajos que condujeron al descubrimiento de la violación de la paridad. Pero ¿qué es la paridad? ¿Cómo se llegó a ese descubrimiento? ¿Por qué los físicos estaban tan excitados?

Afortunadamente, no es necesario saber matemáticas superiores o física para comprender la respuesta a estas preguntas. Pero sí es necesario tener una clara idea de la significación de la simetría izquierda-derecha y de su curioso papel en la historia reciente de las ciencias físicas y biológicas. Este libro se inicia con una sencilla y engañosa cuestión sobre espejos. Primero se examinan las inversiones especulares en una, dos y tres dimensiones; sigue un entreacto sobre la derecha y la izquierda en la prestidigitación y las bellas artes, y luego nos lanzaremos a una amplia exploración sobre la simetría izquierda-derecha y la asimetría en el mundo natural. Esta exploración culminará en un relato del descubrimiento de la violación de la paridad y un intento de relacionarlo con alguno de los misterios más profundos de la física moderna.

En 1958, en una reunión celebrada en Ginebra, se dio a conocer un pequeño descubrimiento en la física de partículas. Ese descubrimiento eliminaba una dificultad teórica que durante mucho tiempo había preocupado a Richard Feynman, un experto en física cuántica con quien nos encontraremos en el capítulo 22. El *New York Times* del 5 de septiembre informaba de que, al oír la noticia, el doctor Feynman se salió de la cola que estaba haciendo en un supermercado y se puso a bailar.

Este libro no trata de enseñar al lector física cuántica, ni tampoco le explicará por qué el doctor Feynman se puso a bailar. Pero el autor espera que los capítulos finales del libro le transmitan algo del talante jubiloso y bailarín del famoso físico cuando desvíe su atención del macromundo de la política al micromundo de las partículas.

Tengo que dar las gracias, sin que implique en absoluto responsabilidad por mis arbitrariedades y errores, a Richard P. Feynman, que examinó una primera redacción del manuscrito de este libro y me hizo numerosas y acertadas sugerencias, y a Banesh Hoffmann, que me corrigió en varios puntos oscuros de uno de los capítulos.

Por su permiso para reproducir ciertos materiales, estoy en deuda con las siguientes personas y editores: Alfred A. Knopf, Inc, por el poema "Cosmic Gall", extraído del libro de John Updike *Telephone Poles and Other Poems*; Bantam Books, Inc, por "The End", del libro de Fredric Brown *Nightmares and Geezenstacks*; *The New Yorker* y Harold P. Furth por el poema "Perils of Modern Living"; *The New Yorker* y Edward Teller por la carta de éste comentando el poema de Furth, y Michael Flanders, por los versos de su poesía "Misalliance".

MARTIN GARDNER

Hastings-on-the-Hudson, Nueva York

Prefacio a la segunda edición

En *The People, Yes*, una obra de Carl Sandburg, hay un episodio en el que un hombre blanco traza en la arena un pequeño círculo y dice: "Esto es lo que el hombre indio sabe". Después traza otro círculo mayor en torno al pequeño, y añade: "Esto es lo que el hombre blanco sabe". El indio toma entonces el palo y dibuja, encerrando a ambos círculos, un inmenso redondel: "Esto es donde el hombre blanco y el hombre rojo nada saben".

Alteremos un poco el simbolismo. El primer círculo representa lo que los antiguos griegos conocían. El segundo, lo que conocemos hoy. El tercer círculo, lo que sabremos dentro de un siglo.

El conocimiento científico viene a ser como un círculo en continua expansión, pero un círculo cuyo perímetro no está definido con nitidez. Es, más bien, como una nube de creencias cuyas probabilidades tienen un amplio margen de variación. En el centro de la nube se encuentran las convicciones, creencias como que la Tierra es redonda, que son "verdaderas" con probabilidad extraordinariamente próxima a 1. Cuanto más alejadas están del centro, tanto más verosímil es que las creencias no sean ciertas. Los contornos de la nube están, por consiguiente, extraordinariamente difuminados, y los integran creencias que no pasan de ser meras posibilidades, sobre las que los especialistas no están de acuerdo. Hay, además, porciones de la nube en perenne desplazamiento, cuya distancia al centro va variando. Un aserto que hoy parece que tiene grandes probabilidades de ser verdadero puede mañana ser considerado falso y desterrado a regiones enteramente exteriores a la nube. Otras creencias, hoy situadas en los márgenes, pueden ir acercándose al centro. Afirmaciones en principio anunciadas de manera tosca están siendo elaboradas continuamente y expresadas con precisión cada vez mayor.

Nadie sabe si hay limitación para el tamaño que la nube puede llegar a alcanzar. Hay desacuerdo, incluso, acerca de lo que significa decir que una creencia es verdadera o falsa, o probablemente verdadera o probablemente falsa. No existe técnica alguna por la cual podamos asignar valores precisos de probabilidad. No obstante, todo el mundo está de acuerdo en una cosa: la nube está expandiéndose. En cierto sentido está justificado decir que la totalidad de la ciencia que Aristóteles conoció es una porción extraordinariamente pequeña de lo que sabemos hoy.

Esta constante expansión del conocimiento científico es una de las pocas facetas de la historia humana –quizá la única– sobre la que podemos afirmar dogmáticamente que está realizando auténticos progresos. Esta expansión se produce, además, con una celeridad cada vez mayor. Así, por ejemplo, hemos aprendido más acerca de la estructura de la materia en los diez últimos años que en los dos milenios posteriores a Aristóteles.

Para quienes escribimos sobre temas científicos, esta aceleración del progreso científico es, a un tiempo, fuente de goces y de frustraciones. Goces, por las sorpresas sin fin que nos depara; frustraciones, por la rapidez con que queda superado y obsoleto lo que uno escribe. En 1952, intrigado por lo que en este libro he llamado "el problema de Ozma", escribí un artículo, "Is Nature Ambidextrous?", que fue publicado en el *Journal of Philosophy and Phenomenological Research* (diciembre de 1952). Consideraba allí la posibilidad de que algún día pudiera resultar que alguna ley fundamental de la naturaleza fuese intrínsecamente asimétrica. La descartaba yo, estimándola casi inconcebible. Cinco años más tarde, lo inconcebible ocurrió. Fue la conmoción que me produjo el descubrimiento de la violación del principio de paridad lo que me empujó a escribir todo un libro sobre la simetría por reflexión especular.

Terminé este libro, originalmente llamado *The Ambidextrous Universe,* en 1963, y al año siguiente fue publicado por Basic Books. Apenas puesto a la venta, se produjo otro acontecimiento casi inconcebible: la invariancia de la simetría temporal quedaba violada en las mismas interacciones débiles en que había sido violada la paridad. Tuve ocasión de añadir unas cuantas páginas sobre la cuestión en la edición en rústica que Mentor hizo de este libro, pero el tema merecía mucho más. Esa es, en efecto, la razón principal de esta nueva edición que ahora tiene en sus manos.

A lo largo del libro hay muchos pequeños cambios que corrigen y actualizan el texto. Sin embargo, el cambio más importante es la

adición de cinco nuevos capítulos que tratan de las últimas especulaciones acerca del tiempo, de la trascendencia que podrían tener en física y cosmología. Si tengo suerte, tal vez pasen unos cuantos años antes de que el libro vuelva a quedar de nuevo desfasado.

MARTÍN GARDNER

Índice de capítulos

1. Espejos

Algunos animales no parecen llegar a darse cuenta de que las imágenes en un espejo son ilusiones. Un periquito, por ejemplo, queda infinitamente fascinado por lo que ve si se le colocan espejitos dentro de su jaula. Es difícil saber lo que acontece en su cerebro, pero la conducta del periquito sugiere que cree estar viendo otro pájaro. Los perros y los gatos son más inteligentes, porque dejan de interesarse por los espejos en cuanto se dan cuenta de que las imágenes no son objetos reales. Los chimpancés también aprenden rápidamente que las imágenes del espejo son ilusorias, pero su elevada inteligencia hace que sientan curiosidad y se interesen vivamente por lo que están viendo. Un chimpancé jugará durante horas con un espejo de bolsillo; se hará muecas a sí mismo, y empleará el espejo para mirar las cosas que están a su espalda. Estudiará qué aspecto tiene un objeto cuando lo observa directamente, y después lo comparará con el aspecto que tiene reflejado en un espejo[1].

No hay mejor manera de comenzar este libro que tratando de ver nuestra imagen en el espejo con una extrañeza y curiosidad semejantes a las del chimpancé. Imagine que toda una pared de la habitación está cubierta con un espejo. Usted está de pie frente a este enorme espejo, mirándolo directamente. ¿Qué es exactamente lo que ve?

Frente a usted, y mirándole fijamente a los ojos, hay una imagen perfecta de usted mismo. ¿Perfecta? No por completo. Su rostro, como todo rostro, no es exactamente igual en el lado derecho que en el izquierdo. Acaso usted se peina con la raya a la izquierda. Una oreja o una ceja puede ser un poco más alta que la otra, su nariz puede torcerse ligeramente hacia un lado, puede haber una cica-

triz o un lunar en un carrillo. Si se observa cuidadosamente, seguro que encontrará algunos rasgos asimétricos. Al observar dichos rasgos en el doble de usted que aparece en el espejo, comprobará que todos ellos están transpuestos. Si usted se hace la raya del pelo a la izquierda, en el espejo aparece a la derecha, y lo mismo ocurre con todos los demás rasgos de la derecha y la izquierda.

La transposición se extiende también, naturalmente, a la habitación misma y a todos los objetos que hay en ella. Es la *misma* habitación, hasta el último detalle, pero al mismo tiempo es curiosamente *diferente*. Como decía Alicia, el personaje de Lewis Carroll, cuando miraba al espejo colocado sobre la chimenea de la sala todas las cosas en la habitación parecían "ir del otro lado".

Ahora bien, no todas las cosas. Las sillas parecen las mismas, y también la mayoría de las lámparas y las mesas. Si se presenta al espejo una copa y un platillo, parecerán por completo una copa y un platillo corrientes. Pero ponga usted ante el espejo un reloj, y verá en el acto que ha cambiado: los números, en lugar de sucederse en la esfera en el sentido dextrógiro, siguen el contrario. (Esta inversión de la esfera del reloj, dicho sea de paso, ha suministrado claves importantes en muchas novelas de misterio. En el misterio de un asesinato en la famosa obra de A. E. W. Mason *The House of the Arrow*, una pista esencial es el recuerdo de una muchacha de lo que ha visto en la esfera de un reloj. Resultó que había abierto una puerta y mirado rápidamente un reloj sin darse cuenta de que lo estaba viendo en un espejo. Naturalmente, interpretó mal lo que había visto.)

Sitúe un libro frente al espejo. Si está usted lejos de la imagen parecerá que el libro no ha cambiado. Acérquese lo bastante para leer el título y verá inmediatamente que las letras "van en la otra dirección". De hecho, las palabras del revés no son fáciles de leer. Tal vez recuerde que inmediatamente después de que Alicia hubo entrado en la habitación del espejo, abrió un libro en la mesa y se encontró con el poema más absurdo del mundo. Así es como estaba impresa la primera estrofa:

> La Luna es la causa de los grandes amores y
> de los grandes fracasos,
> el Sol es el juez que dicta esta sentencia.

Alicia era lo bastante inteligente para darse cuenta de que si la imagen de un espejo era a su vez reflejada, sería lo mismo que si no hubiera sido reflejada en absoluto. "Porque esto es, naturalmente,

un libro reflejado —exclamó—. Y si yo lo sostengo ante un espejo, las palabras volverán a sucederse en el orden debido."

Los niños pequeños suelen asombrarse y divertirse con esta peculiar facultad de los espejos para descifrar instantáneamente un mensaje escrito o impreso con las letras del revés. Los adultos no. Tan acostumbrados están a esta propiedad de los espejos, que la dan por supuesta. Creen comprenderla perfectamente. ¿Pero la comprenden realmente? ¿La comprende usted de verdad?

Trataré de confundirle con una sencilla pregunta. ¿Por qué el espejo transpone únicamente los lados derecho e izquierdo de las cosas y no los de arriba y abajo? Pensémoslo cuidadosamente. La superficie del espejo es perfectamente lisa y plana. Sus lados derecho e izquierdo no difieren en nada de las partes superior e inferior. Si es capaz de transponer el lado izquierdo de su cuerpo a la derecha y el derecho a la izquierda, ¿por qué no invierte también su cabeza y sus pies? Cada línea, en la invertida estrofa de *Jabberwocky*, se lee de la derecha a la izquierda. Vista en un espejo, los versos se leen de la izquierda a la derecha, ¿por qué, entonces, la línea superior sigue estando arriba y la línea inferior abajo? Si el espejo cambia la izquierda y la derecha, ¿qué ocurre si damos al espejo un cuarto de vuelta en el sentido de las agujas de un reloj? ¿Quedará cabeza abajo la imagen de nuestro rostro? Desde luego, sabemos que no sucede tal cosa. Entonces, ¿por qué esta fantástica y persistente preferencia por la izquierda y la derecha? ¿Por qué un espejo invierte la habitación horizontalmente, pero no puede hacerlo en sentido vertical?

Espero que estas preguntas comiencen a hacerle sentirse un poco más como un mono inteligente que contempla su imagen en un espejo de bolsillo. Son, en verdad, preguntas desconcertantes. Plantéeselas a sus amigos. Es probable que les parezcan también embrolladas. Suscitará muchas risas embarazosas e intentos balbuceantes de explicación, pero será difícil que alguien dé una respuesta clara y correcta. Respecto a los espejos, los adultos son más como los gatos y los perros que como los monos. Dan por supuestas las imágenes del espejo, sin esforzarse en ver claramente lo que hace un espejo.

Para hacer la cuestión aún más desconcertante, es muy fácil construir espejos que no transpongan en absoluto la derecha y la izquierda. Por ejemplo, hágase con dos espejos rectangulares sin marco y colóquelos de pie en una mesa, como muestra la figura 1. Los espejos deben formar ángulo recto entre sí, tocándose sus bor-

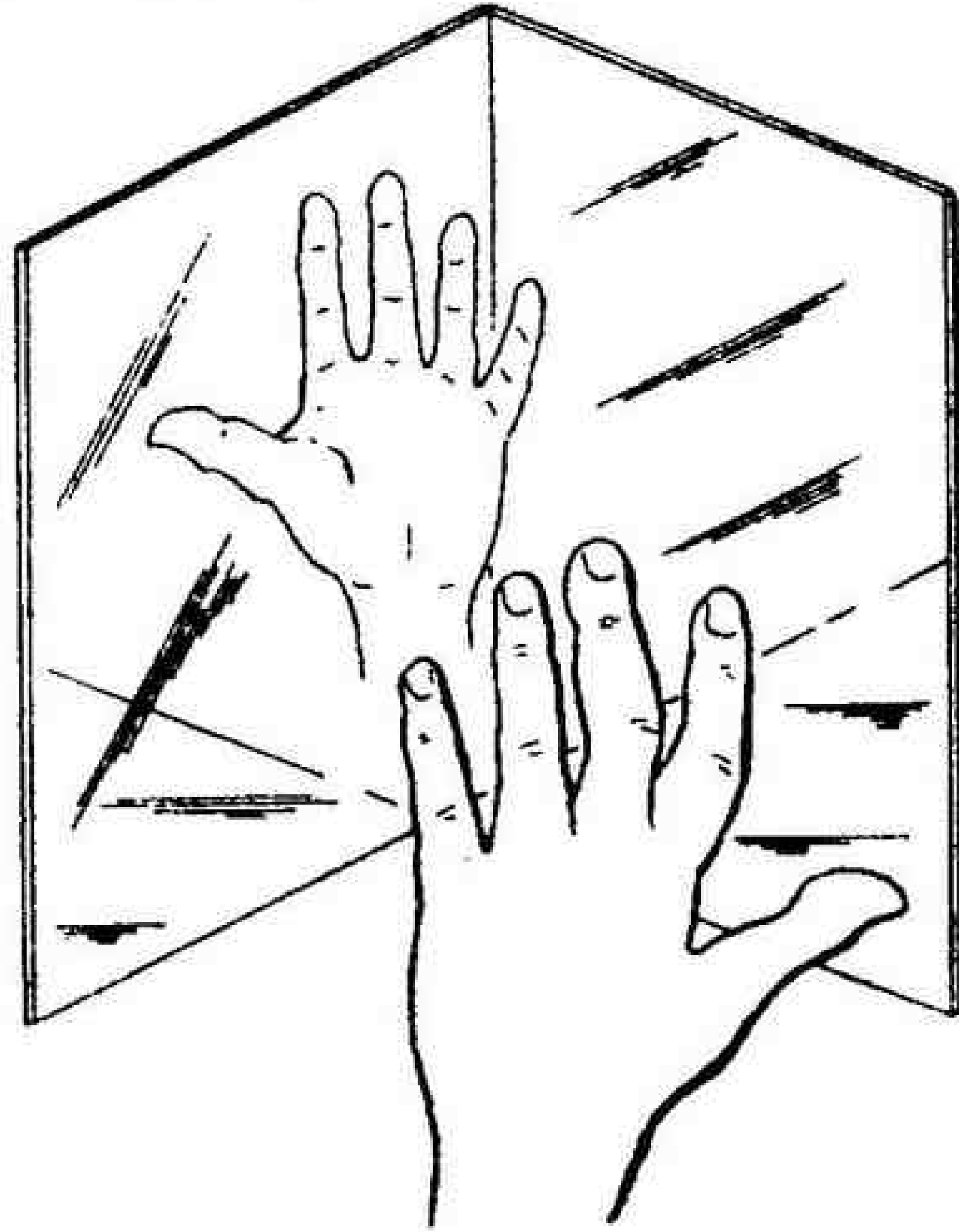


Fig. 1. Un espejo doble que no trastrueca las imágenes.

des. Inclínese y mire directamente a los espejos. Verá una imagen de su rostro. Si la imagen es demasiado ancha o demasiado estrecha, ajuste los espejos hasta que parezca normal. Pero ¿es normal? Guiñe el ojo derecho. En lugar de guiñar el ojo izquierdo –es decir, el ojo directamente opuesto a su ojo derecho–, la imagen guiña el ojo *derecho*. La imagen no es una imagen "normal" del espejo, pero es normal en el sentido de que es una imagen fiel, *no invertida*. Por primera vez usted está viéndose en un espejo *exactamente* como los demás le ven a usted.

Otro modo de hacer un espejo así es combar un espejo –una lámina de metal lo bastante pulimentada para dar una imagen reflejada–, hasta curvarlo ligeramente, como se ve en la figura 2. Cuando usted obtenga una imagen no deformada de su rostro, verá que no está invertida. Puede comprobarlo fácilmente guiñando un ojo o sacando la lengua hacia un lado. Un espejo curvo de esta clase era conocido por los griegos antiguos. Platón, el famoso filósofo griego, lo describe en su diálogo *Timeo*. También fue descrito por Lucrecio, el poeta romano, en un capítulo sobre los espejos en el libro cuarto de su gran poema científico *De rerum natura* (*De la naturaleza*).

¿Qué le ocurre a la imagen de su rostro si usted da un cuarto de vuelta a estos extraños espejos? La imagen inmediatamente se invierte cabeza abajo (véase figura 3). Evidentemente cada espejo

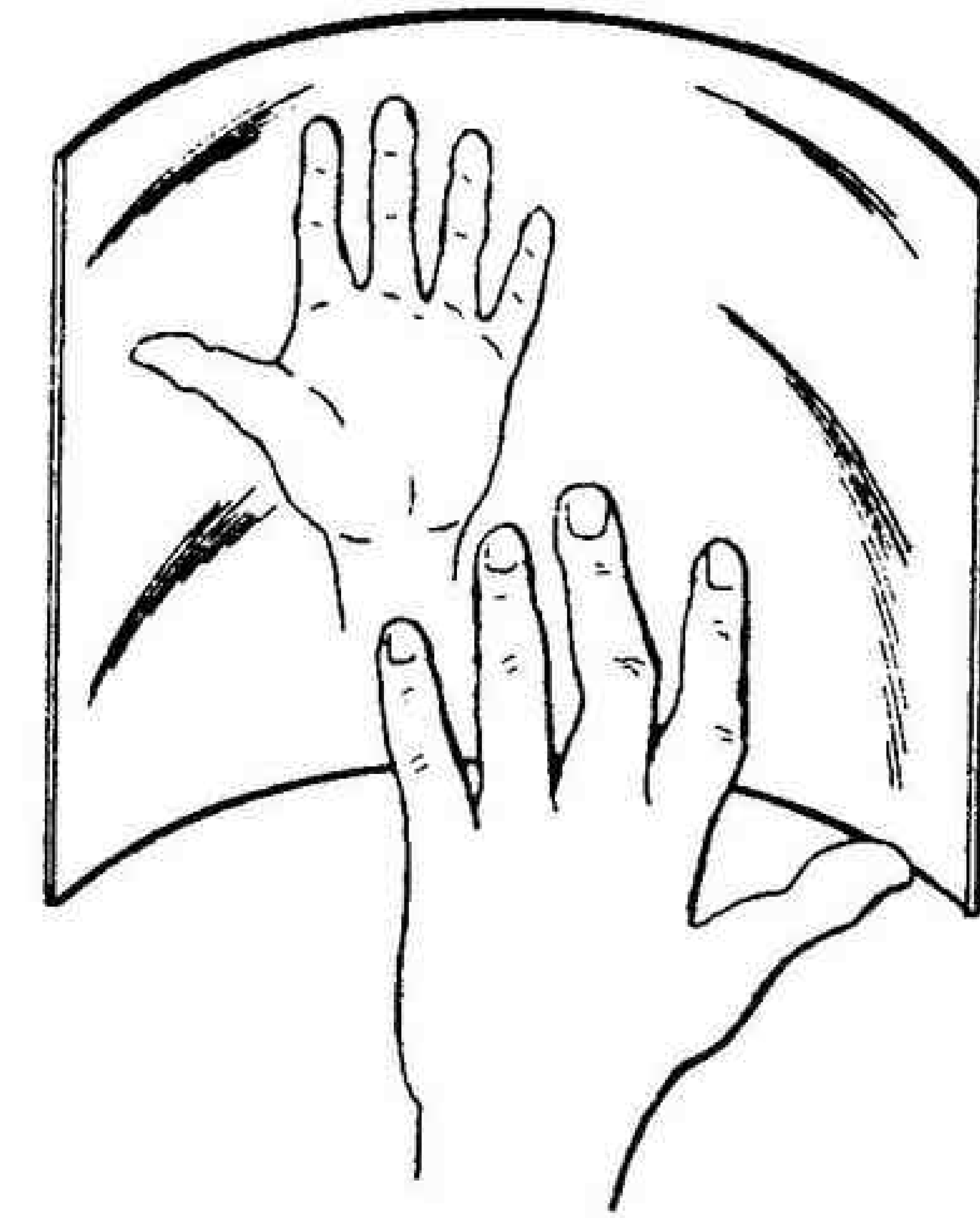


Fig. 2. Un solo espejo curvado que no trastrueca las imágenes.

mantenido en una cierta posición no transpone ni derecha ni izquierda, ni tampoco arriba y abajo. Colocado de otra manera, el mismo espejo invierte las posiciones de arriba y abajo.

Como sin duda un chimpancé se dice a sí mismo cuando reflexiona sobre las imágenes de los espejos, la cuestión merece más estudio; nosotros comenzamos este estudio en el próximo capítulo, observando más de cerca lo que hace exactamente un espejo con

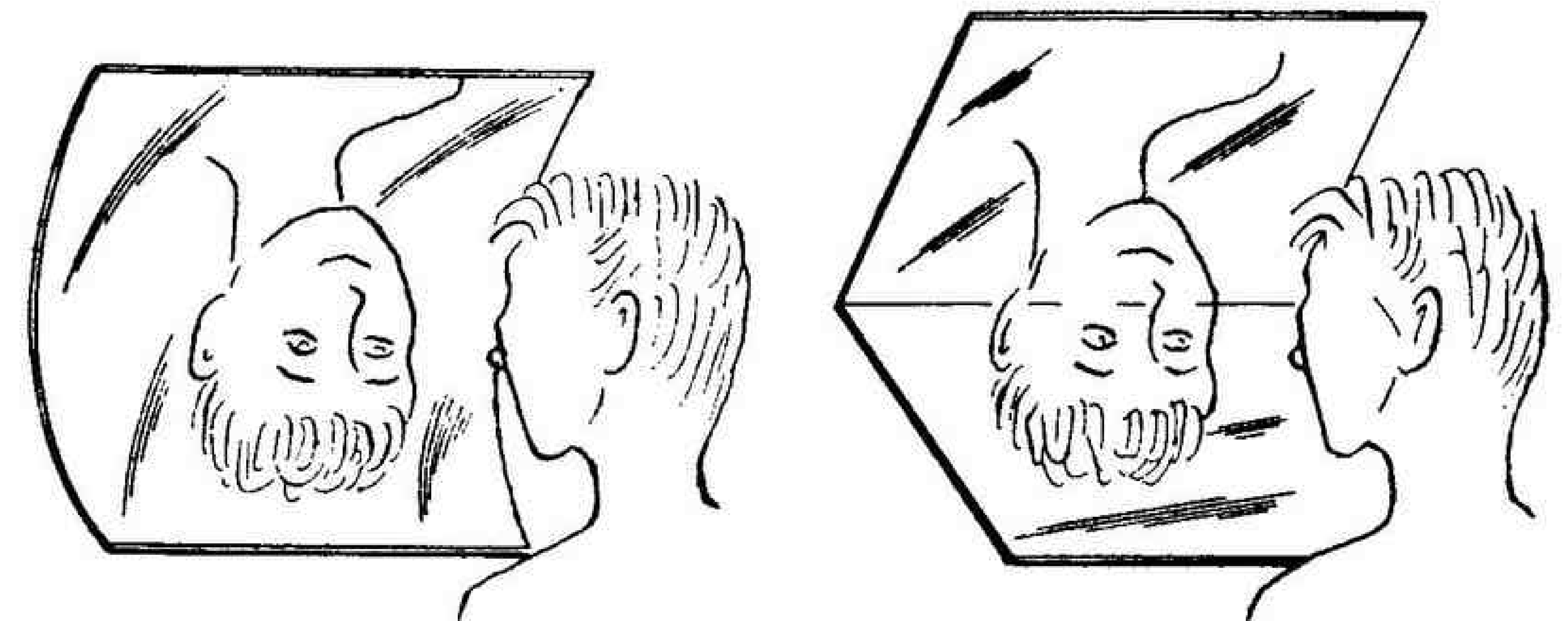


Fig. 3. Estos dos espejos, cuando giran 90 grados, invierten cabeza abajo las imágenes.

las figuras geométricas de una y dos dimensiones. Antes de concluir nuestro estudio tendremos que explorar muchas extrañas verdades científicas, algunas frívolas, otras no tanto. Dos de los acontecimientos científicos más extraordinarios de este siglo –el descubrimiento de la violación de la paridad en Física, y el de la estructura helicoidal de la molécula portadora del "código genético", en Biología–, están íntimamente relacionados con las nociones de derecha e izquierda y la naturaleza de las inversiones de los espejos. Al final, nuestra investigación nos sumirá directamente en algunas de las aguas más profundas y menos surcadas de la ciencia contemporánea.

2. Rectilandia y Planilandia

Vivimos en un mundo de tres dimensiones o, como gustan decir los geómetras modernos, un mundo de dimensión 3. Todo objeto sólido puede ser medido a lo largo de un eje Norte-Sur, un eje Este-Oeste y un eje de arriba-abajo. (Un amigo me dijo que el profesor de matemáticas de su colegio, un tipo fantástico, solía explicar estos tres ejes andando hacia delante y atrás frente a sus alumnos, después de un lado a otro por el pasillo central y, finalmente, saltando verticalmente de abajo arriba.) Las figuras geométricas de dimensión 3 son estudiadas en geometría del espacio. Si limitamos nuestra atención a dos dimensiones, tenemos la geometría plana, es decir, la geometría de las figuras trazadas en una superficie plana, de dos dimensiones. Podemos descender un peldaño más y considerar figuras de dimensión 1, o sea, figuras que pueden ser colocadas sobre una línea recta. Es provechoso considerar la naturaleza de las imágenes de espejos de estos tres espacios.

Comenzaremos al nivel más sencillo con Rectilandia, el país lineal, el espacio constituido por todos los puntos a lo largo de una sola línea recta que se prolonga al infinito en ambas direcciones. Imaginemos, por juego, que esta línea está habitada por una raza de criaturas primitivas que llamaremos "rectilandeses". Los rectilandeses machos son largos guiones con un ojo (representado por un punto) en un extremo. Las hembras son guiones más cortos, también con un ojo en un extremo. Los ojos no se desarrollan hasta que el rectilandés llega a la edad adulta. Los niños son sencillamente pequeños guiones sin ojos. Para hacer la vida más interesante a los rectilandeses podríamos darles un mundo consistente en una complicada *red* de líneas, de modo que pudieran trasladarse adelante y atrás a lo largo de la red y volverse de un lado a otro como

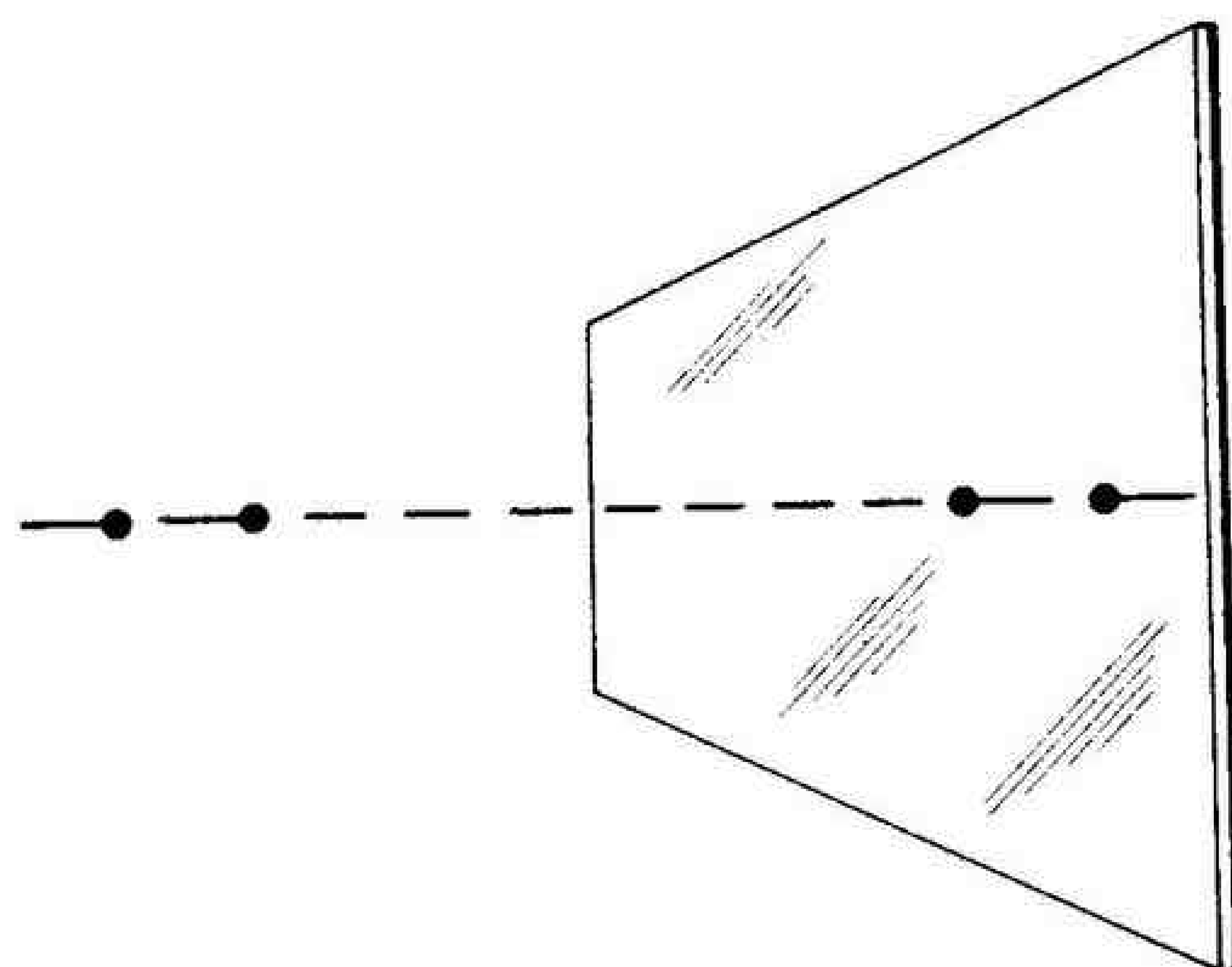


Fig. 4. Rectilandeses y sus imágenes en el espejo.

un vagón en una vía ferroviaria, pero esto complicaría indebidamente la cuestión, de modo que los confinaremos en una sola recta.

Si colocamos un espejo perpendicularmente a la línea, como en la figura 4, obtenemos una imagen de los rectilandeses en el espejo. La figura muestra el espejo entero, pero para los rectilandeses su "espejo" es nada más un punto de su recta. Observad que un niño rectilandés es exactamente igual a su imagen en el espejo. Los matemáticos lo exponen de esta manera: el niño es *superponible* a su imagen en el espejo. Esto significa que podemos imaginar al niño deslizándose a lo largo de la línea hasta su imagen reflejada, *sin darle la vuelta en el plano,* hasta que coincida, punto por punto, con su doble reflejado en el espejo. Cuando esto ocurre, decimos que la figura es *simétrica.*

¿Son simétricos los adultos rectilandeses? No; porque es imposible lograr por mero deslizamiento sobre la recta que coincidan exactamente con sus imágenes reflejadas. Así ocurre porque los dos extremos del rectilandés adulto son diferentes. Supóngase que la línea corre de Este a Oeste. Si un adulto rectilandés está mirando al Este, su imagen en el espejo mirará al Oeste. Naturalmente podemos darle la vuelta y hacer que coincida, punto por punto, con su imagen, mas para ello tenemos que sacarlo de la línea y llevarlo a través de una dimensión más alta, el mundo de dos espacios. A causa de que el rectilandés adulto no puede ser superpuesto a su imagen del espejo sin hacerle pasar a otra dimensión, decimos que su figura es *asimétrica.*

Hay otro modo de distinguir entre simetría y asimetría en Rectilandia. Si una figura es simétrica hay siempre un solo punto, exactamente en el centro de la figura, que la divide en dos mitades idénticas, la una imagen de la otra. Tal punto se llama el *centro de simetría.* Si colocamos el espejo en este punto, perpendicularmente a la línea, mirando en una dirección cualquiera, la mitad expuesta de la figura, junto con la imagen, reproducirá la figura original entera. ¿Sería simétrico un rectilandés con un ojo en cada extremo? Sí. Tal figura sería también superponible a su imagen en el espejo; habría un centro de simetría dividiendo la figura en medias imágenes especulares.

Imagine una Rectilandia en la que vivan únicamente tres adultos, A, B y C, todos mirando al Este. Si hacemos a uno de ellos mirar al Oeste, por ejemplo, el del medio, B, este cambio será percibido inmediatamente por las tres criaturas. Ahora A y B se están mirando uno a otro. B y C están espalda con espalda. Si invertimos toda la línea, es decir, todo el "universo" de Rectilandia, los rectilandeses no se dan cuenta de que ha ocurrido un cambio. En efecto, para ellos no tendría significación decir que se había producido un cambio. *Nosotros* sabemos que la línea ha sido invertida porque vivimos en un espacio de tres dimensiones y podemos ver el universo de los rectilandeses en relación con el mundo exterior a él. Pero los rectilandeses no pueden concebir una dimensión mayor que uno. Únicamente conocen su propio universo, la sola línea sobre la cual viven. Para ellos no ha ocurrido ningún cambio en absoluto. Sólo cuando se invierte una *porción* de su universo pueden darse cuenta de un cambio.

En Planilandia, el mundo bidimensional de la geometría plana, las cosas son más interesantes, pero con respecto a la simetría especular siguen esencialmente lo mismo que antes. En la figura 5, el ilustrador ha dibujado una concepción estilizada de un planilandés asimétrico y su imagen en un espejo vertical. (El espejo está dibujado en el espacio tridimensional, pero para el planilandés *su* espejo no es más que una línea recta frente a él.) No hay modo de que él pueda superponerse a su imagen en el espejo; no hay modo de hacer que se deslice sobre el plano y coincida punto por punto con su imagen. Si pudiéramos alzarlo como a un muñeco de papel, podríamos *darle la vuelta* y ponerlo sobre el plano del revés. Pero este volteo habría tenido lugar en tres dimensiones. Eso no puede hacerse en el mundo bidimensional de Planilandia.

¿Qué ocurre si sostenemos el espejo por encima o debajo del

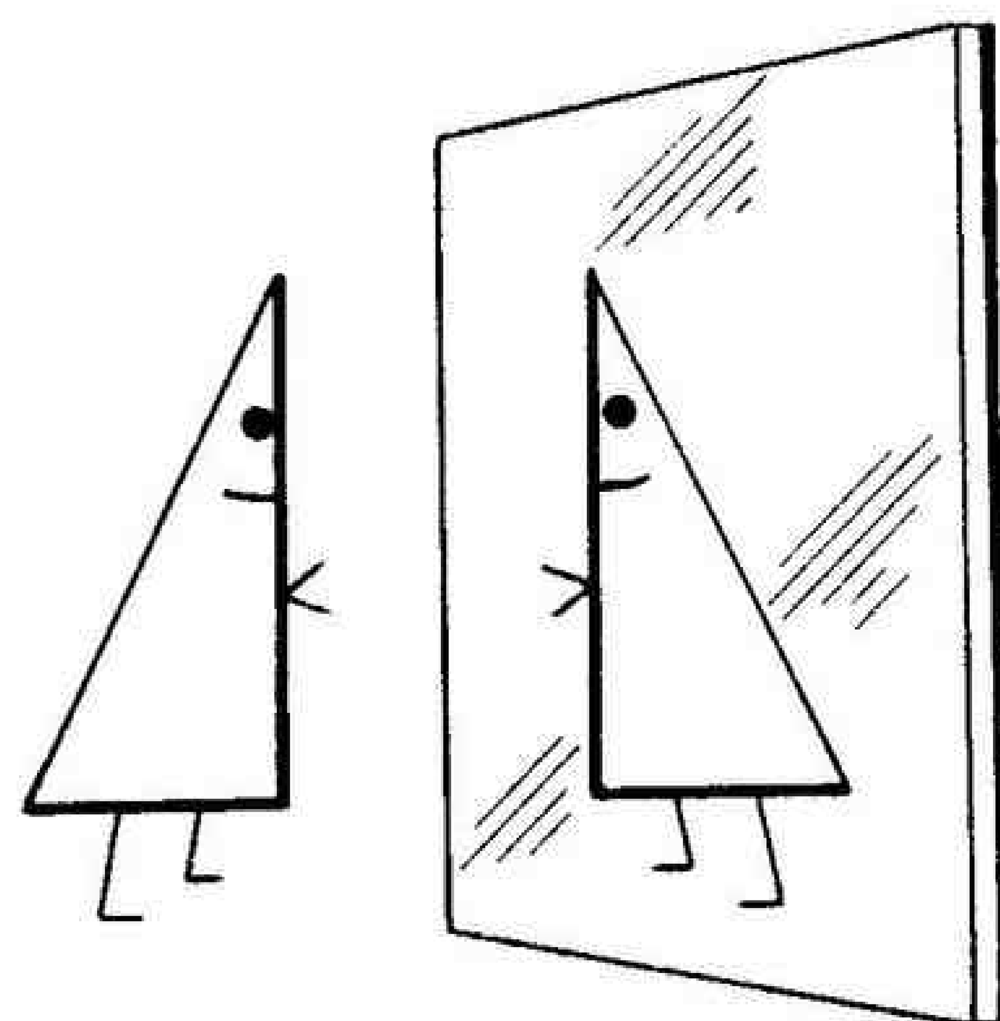


Fig. 5. Un planilandés y su imagen en un espejo vertical.

planilandés, como se ve en la figura 6? En este caso se produce una inversión de la cabeza y los pies, porque es el eje vertical el perpendicular al espejo. Pero la imagen invertida es realmente la misma que antes; únicamente ha cambiado de posición en el plano. Podemos tomar cualquiera de las dos imágenes reflejadas de la figura 6 y hacerlas girar de modo que coincidan punto por punto con la imagen reflejada de la figura 5. No importa lo más mínimo donde pongamos el espejo: una reflexión de un planilandés asimétrico siempre produce la misma imagen invertida.

Es fácil dibujar en Planilandia toda clase de figuras simétricas y que por tanto no se invierten en el espejo. Cuadrados, círculos, elipses, triángulos equiláteros, triángulos isósceles, rombos, corazones, espadas, tréboles –ninguno de ellos cambia al reflejarse en un espejo–. En Rectilandia (como hemos visto) una figura simétrica tiene un *punto*, llamado centro de simetría, que la divide en dos medias imágenes especulares. En Planilandia todas las figuras simétricas pueden ser divididas en dos por una *línea* llamada *eje de simetría*, que hace exactamente lo mismo. La figura 7 muestra diversas figuras planas simétricas. Los ejes de simetría se ven como líneas de puntos. Obsérvese que el número de ejes que tiene una figura puede variar de uno al infinito. El círculo es la única figura plana que tiene un número infinito de ejes. Las demás figuras tienen un número finito de tales ejes. Como en Rectilandia, si se coloca un espejo de modo que su arista coincida con un eje de simetría, la imagen del

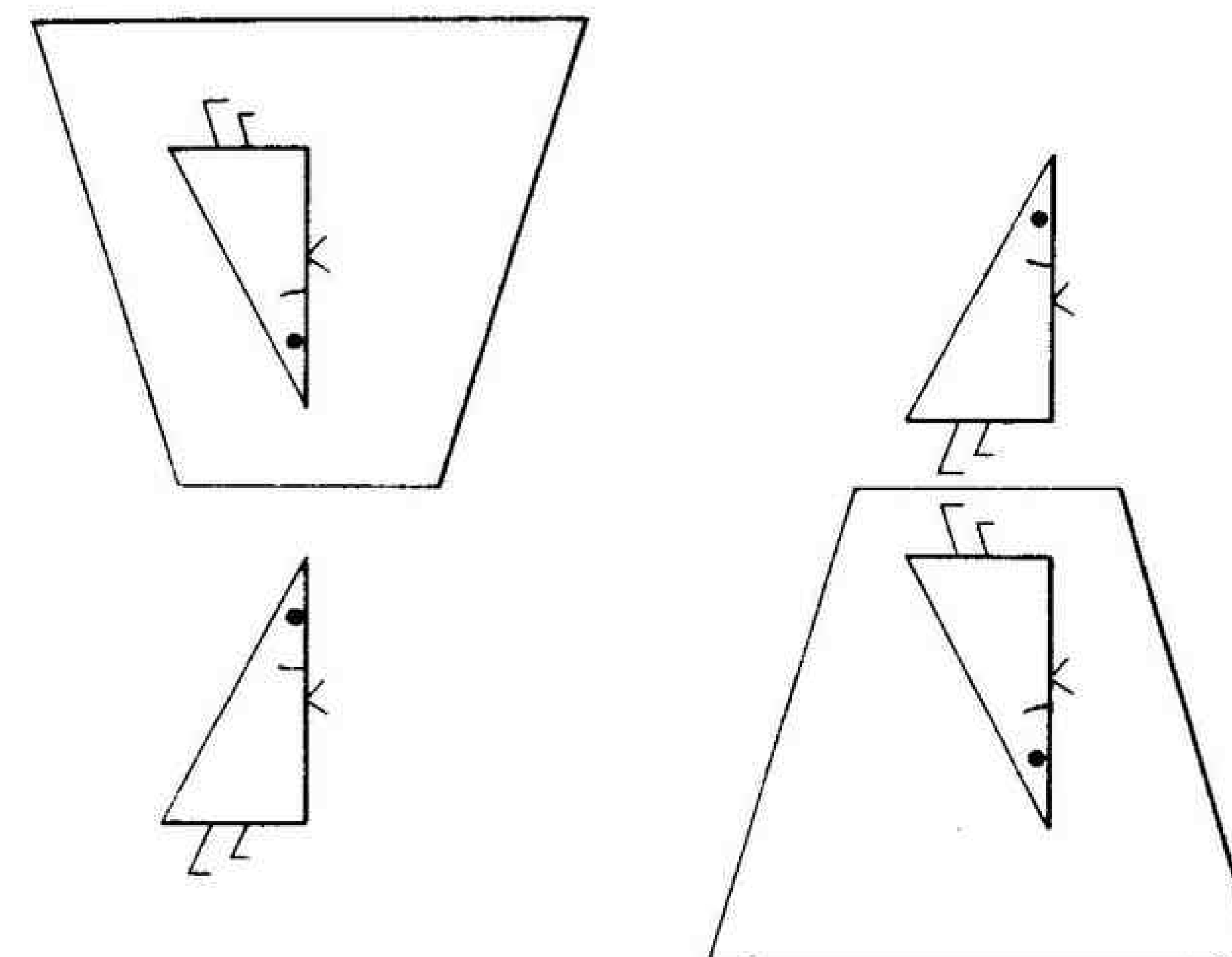


Fig. 6. Un planilandés y su imagen en espejos horizontales.

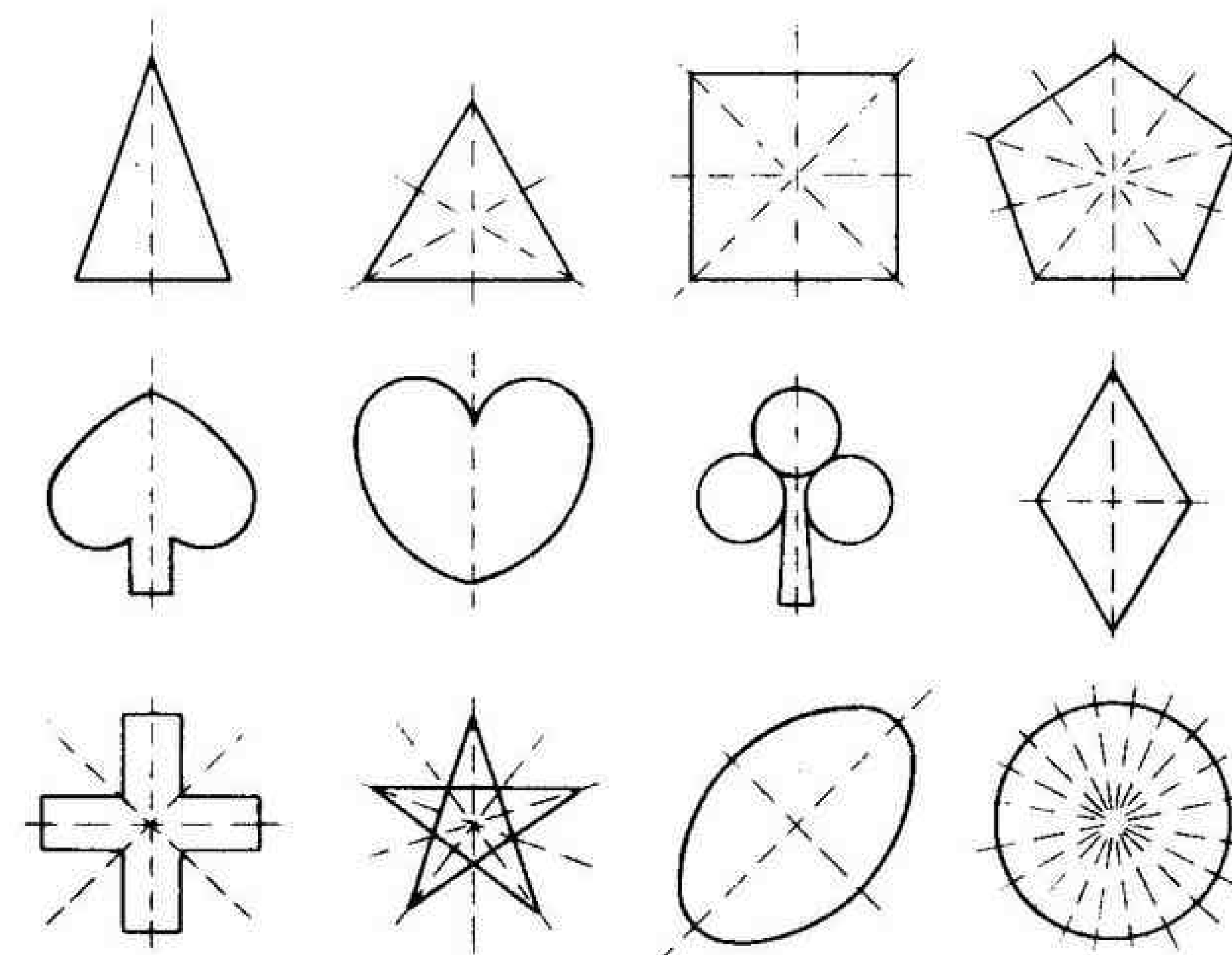


Fig. 7. Figuras planas con uno o más ejes de simetría.

espejo más la parte expuesta de la figura restablecerá la forma de la figura original.

Toda figura plana que tenga *por lo menos un* eje de simetría es simétrica en el sentido de que puede ser superpuesta punto por punto a su imagen reflejada. Los matemáticos hablan de otros muchos tipos de simetría (algunos mencionados en el capítulo 11), pero en este libro sólo nos interesa uno: la *simetría de reflexión*.

Siempre que decimos de una figura que es "simétrica" (cualquiera que sea el número de sus dimensiones), queremos significar únicamente que es idéntica (superponible) a su imagen reflejada, sin tener que darle la vuelta en un espacio de dimensión mayor. Siempre que hablamos de una figura como "asimétrica" sólo queremos indicar que no es idéntica (superponible) a su imagen del espejo.

Es fácil dibujar en un plano figuras asimétricas. Por ejemplo, el romboide, la esvástica y la espiral de la figura 8 no pueden ser superpuestas a su imagen especular. Si usted trata de dividirlas por la mitad con una línea que las corte en dos medias imágenes especulares se encontrará con que es imposible hacerlo. No hay modo de colocar la arista del espejo en una de estas figuras de modo que la parte expuesta de la figura y su imagen reflejada formen, unidas, la figura original. Por esta razón, cada figura puede ser dibujada en el plano de dos formas diferentes. La esvástica mostrada aquí es la forma que los nazis escogieron como su símbolo. Las dos formas de esvásticas son símbolos antiguos que han sido usados por muchas culturas diferentes.

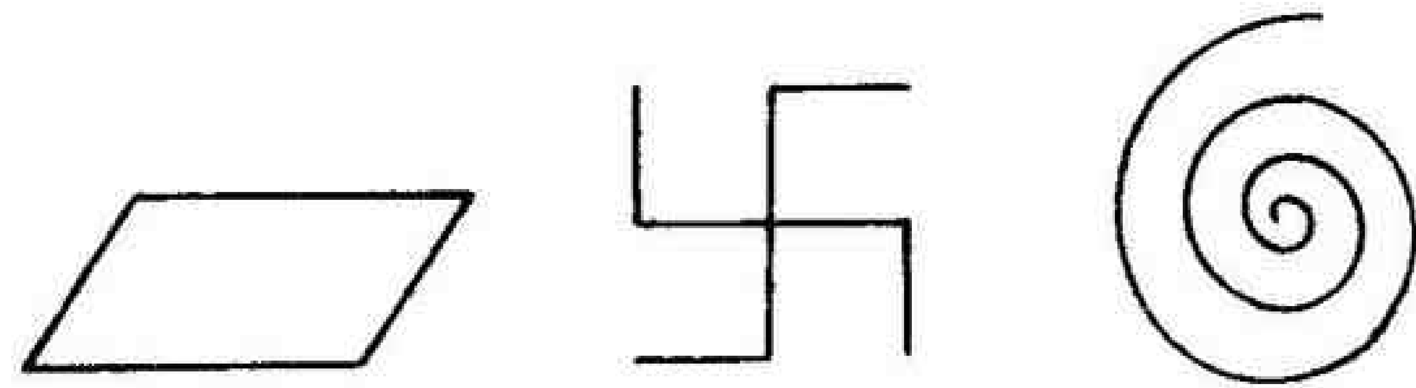


Fig. 8. Figuras planas asimétricas.

Algunas de las letras mayúsculas de nuestro alfabeto son simétricas, otras no. Esto sugiere el primer ejercicio de este libro (todos los ejercicios están numerados, y las respuestas se encuentran en las últimas páginas):

A B C D E F G H I J K L M N O P

Q R S T U V W X Y Z

Fig. 9. ¿Qué letras son asimétricas?

EJERCICIO 1: *En la figura 9, ¿qué mayúsculas son simétricas, y cuáles asimétricas?*

Pruebe a responder la pregunta sin auxilio de un espejo. Recuerde que si una letra es simétrica será posible encontrar al menos una línea (acaso más) que la divida en dos mitades idénticas como imágenes especulares. Si no hay tal eje de simetría, la letra es asimétrica. Escriba todas las letras simétricas en una hoja de papel y todas las asimétricas en otra. Sitúe ante un espejo las letras simétricas. Si todas son correctas, será posible girar el papel de modo que cada letra mire en la dirección debida. Puede ser necesario hacer girar el papel de un cierto modo para lograr que una letra muestre aspecto correcto, y de otro modo para que lo muestre otra. La causa es que los ejes de simetría no van todos en la misma dirección. La letra A, por ejemplo, tiene un eje vertical de simetría. Parece la misma cuando se sitúa la hoja con su lado derecho hacia el espejo. Pero la letra B tiene un eje horizontal de simetría. Al principio, el espejo parece volverla del revés, pero giremos la hoja, invirtiéndola, y la letra B parecerá normal otra vez.

Después de haber comprobado la simetría de las letras en el espejo, pruebe a trazar en cada letra todos los ejes de simetría que posee. Se puede hacer en todas las letras excepto en la O. Si la O tuviera forma de elipse, tendría solamente dos ejes, pero por ser un círculo, tiene un número infinito de ellos.

Coloque ahora frente al espejo la hoja en que están rotuladas las letras asimétricas. Si todas son correctas, será imposible que al girar el papel alguna letra muestre en el espejo el aspecto debido. Todas las letras asimétricas tienen imágenes en el espejo que "van a contramano". Si se examinan en el papel, se verá que es imposible dividir cualquiera de ellas mediante un eje de simetría. Estas variaciones en la simetría de las letras hacen posible un cierto número de trucos divertidos con palabras, pero antes de explicar algunos (en el capítulo 4), debemos dedicar un capítulo a la simetría y asimetría de las figuras tridimensionales, del sólido mundo de dimensión 3 en el que vivimos.

3. Solidlandia

Tanto en el mundo de dimensión 3 como en los mundos de dimensiones 1 y 2, todas las figuras pueden dividirse en dos grupos: las que son simétricas y las que son asimétricas. Las figuras sólidas simétricas son figuras que se pueden superponer punto por punto a sus imágenes reflejadas. Las figuras sólidas asimétricas son las que no pueden ser superpuestas. Las figuras simétricas en el espacio unidimensional, como hemos visto, tiene un *punto* de simetría; las figuras simétricas bidimensionales tienen un eje o una recta de simetría. Como cabría esperar, las figuras simétricas de dimensión 3 tienen lo que se llama *un plano de simetría.*

Algunos ejemplos aclararán esta cuestión. Una esfera es una figura sólida que, evidentemente, es idéntica a su imagen en el espejo. Lo mismo que un círculo puede ser dividido en dos por un número infinito de líneas rectas que lo parten en dos mitades idénticas, así la esfera puede ser cortada a través de su centro por un número infinito de planos que hacen lo mismo. Si un plano de simetría se imagina como un espejo, entonces la mitad de la esfera, junto con su imagen en el espejo, restauran la esfera original. Imagínese una pelota de ping-pong cortada por la mitad. Si usted coloca el borde del corte de una de las dos mitades de la pelota sobre un espejo, la imagen se combina con la media pelota para reconstruir la pelota original.

La esfera no es la única figura sólida que tiene un número infinito de planos de simetría. Un cigarrillo cilíndrico, por ejemplo, tiene infinidad de planos que pasan por su eje, más un plano de simetría que corta el eje, por su centro, en ángulo recto. Un cono de helado también tiene una infinidad de planos de simetría que pasan por su eje, pero no un plano de simetría perpendicular al eje.

Para que un objeto sólido sea simétrico ha de tener por lo menos *un* plano de simetría, aunque puede tener un número finito o infinito de tales planos. La Gran Pirámide tiene cuatro. Una mesa de tablero rectangular tiene dos. Un ladrillo tiene tres. Una silla y una taza de café tienen solamente uno cada una. Imaginad una taza de café cortada a la mitad a lo largo de su plano de simetría. Si ponemos cualquiera de sus mitades contra un espejo, la mitad y su imagen restablecerán la figura original. (Esta es, naturalmente, la significación de plano de simetría.) El hecho de que una taza de café tenga un plano de simetría hace que sea una broma hablar de tazas para diestros y para zurdos.

Los planos de simetría han sido dibujados en todos los sólidos de la figura 10, excepto en el cubo. Estudie el cubo cuidadosamente y vea si puede responder a la siguiente pregunta:

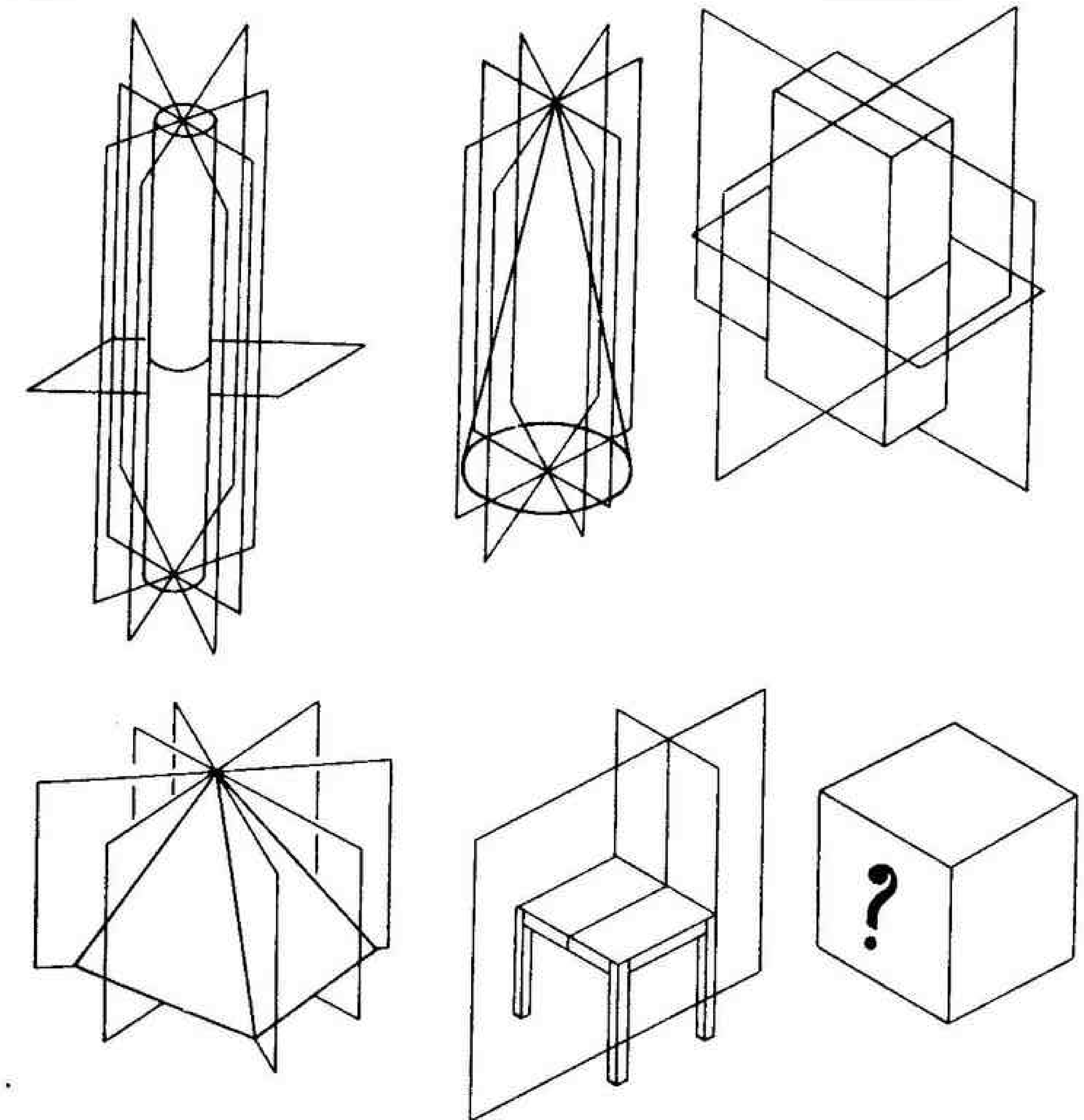


Fig. 10. Planos de simetría.

EJERCICIO 2: *¿Cuántos planos de simetría tiene un cubo?*

Para superponer objetos simétricos a su imagen en el espejo puede ser necesario hacer girar una imagen en el espacio de tres dimensiones para ajustarla a la otra. Supongamos, por ejemplo, que usted tiene un cono de helado frente a un espejo. Si lo tiene, como muestra la figura 11 (a la izquierda), de modo que el espejo sea paralelo a uno de los planos de simetría, es posible superponer las dos figuras sencillamente moviéndolas juntas hasta que coincidan. Pero si se coloca el cono apuntando hacia el espejo, como en la figura 11 (a la derecha), se dice que las dos figuras tienen una diferente *orientación* en el espacio de dimensión 3. Para que coincidan hay que girar una figura, hasta que los dos conos tengan la misma orientación. La esfera no necesita que se la gire, ya que no importa cómo usted la presente al espejo, éste siempre es paralelo a uno de los infinitos planos de simetría de la esfera.

Los objetos sólidos asimétricos son los que *no* tienen ningún plano de simetría; nunca se les puede hacer coincidir con sus imágenes por mucho que se les haga girar. Un simple ejemplo nos lo suministran la hélice, la curva de una escalera de caracol y la raya roja en una barra de caramelo. Así como la espiral es asimétrica en el plano, la hélice o espiral tridimensional es asimétrica en el espacio de dimensión 3. Haga lo que haga, usted nunca será capaz de pasar un plano a través de la hélice de tal modo que corte la hélice en dos mitades idénticas. Poned una hélice ante un espejo; no importa cómo se la haga girar, en el espejo siempre "va del otro lado".

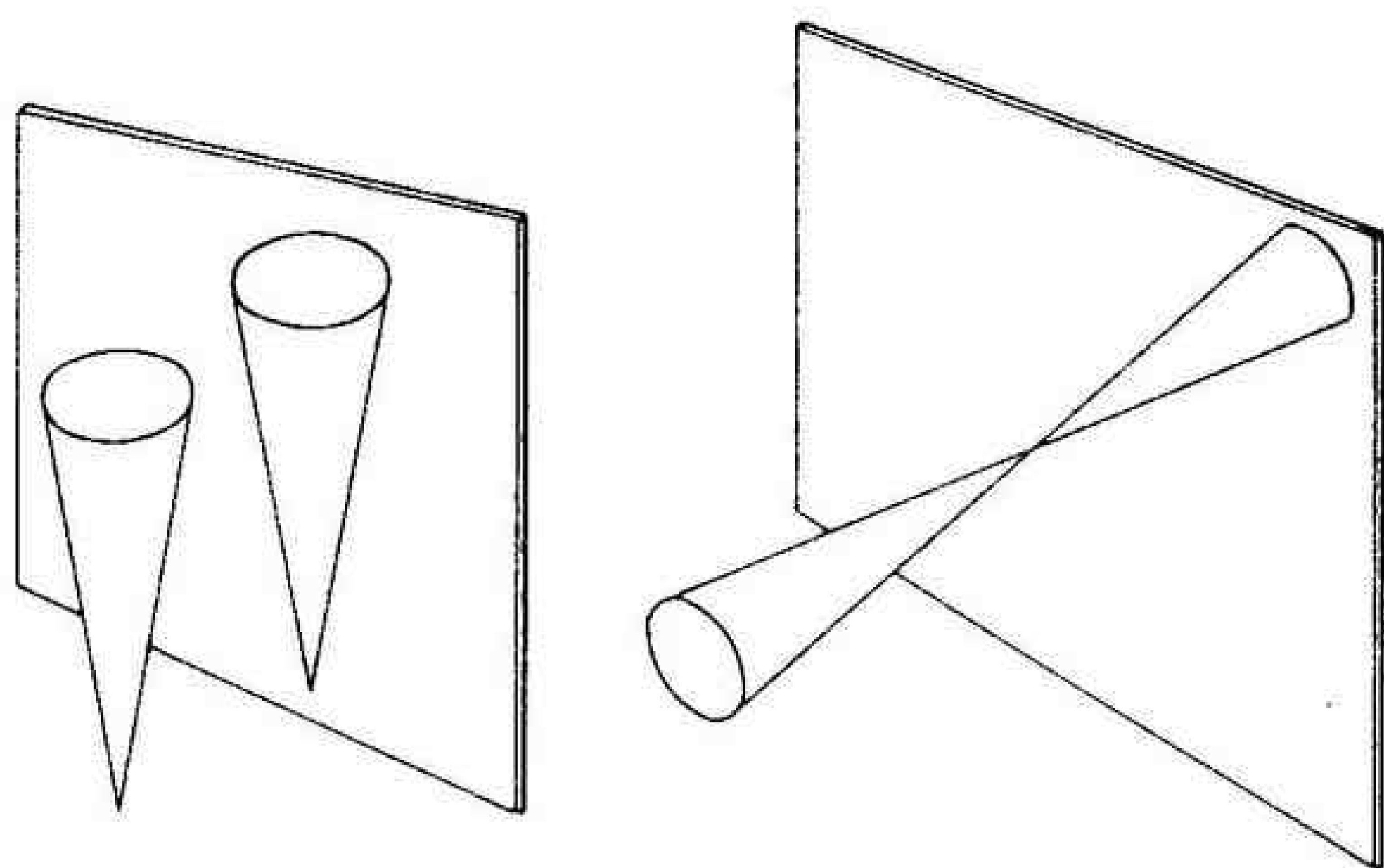


Fig. 11. Un cono en cualquier orientación es superponible a su imagen.

Toda figura sólida asimétrica tiene en la imagen del espejo un duplicado exactamente como ella, excepto en que "va del otro lado". Dos figuras asimétricas, con una imagen especular, cada una, de la otra son *enantiomorfas*. Cada una de ellas es enantiomorfa de la otra. Un ejemplo muy conocido de un par de enantiomorfos es el de nuestras dos manos. Si se las pone juntas, palma contra palma, se ve que cada una es la imagen especular de la otra. Es un ejemplo tan corriente que los enantiomorfos se distinguen uno de otro llamando a uno diestro o derecho y al otro zurdo o izquierdo. Un par de guantes es un par de enantiomorfos. Los zapatos nos dan otro ejemplo. Los ojos de una persona son enantiomorfos.

Un objeto que tiene una hélice es asimétrico. Un sacacorchos, o cualquier tipo de tornillo, tuerca o perno tienen filetes helicoidales. Los tornillos están hechos de modo que avanzan haciéndolos girar con un destornillador en el sentido de las agujas del reloj. De tales tornillos se dice que son dextrorsum, que sus filetes corren hacia la derecha. A veces se fabrican tornillos "a izquierdas" para objetivos especiales. En los autos, por ejemplo, los espárragos, tornillos que aseguran las ruedas en los ejes, giran a la derecha en un lado del coche y a la izquierda en el otro lado. (La razón es que el giro de las ruedas tiende a girar los tornillos en una dirección diferente en los lados opuestos del coche. Los espárragos de diferente mano evitan que las ruedas se aflojen mientras el auto se mueve.) Las bombillas de luz eléctrica que se compran en los almacenes tienen los filetes helicoidales corriendo a la derecha alrededor de sus bases, pero las bombillas que se utilizaban antes en los vagones del "Metro" de Nueva York tenían la hélice girando a la izquierda, para impedir que los ladrones pudieran robarlas para usarlas en su casa. (Las bombillas han sido sustituidas por lámparas fluorescentes con instalaciones especiales.) ¿Se ha oído alguna vez de un sacacorchos que gire hacia la izquierda? Sí, pueden comprarse en tiendas de artículos de broma. Si se le ofrece a alguien que quiera abrir una botella, se verá el tiempo que tarda en darse cuenta de por qué el sacacorchos no funciona. Desde luego, si se hace girar en sentido contrario al de las agujas de un reloj actúa tan bien como un sacacorchos que gire "a derechas".

EJERCICIO 3: *¿Puede dar usted alguna razón de por qué es una convención en todo el mundo que los tornillos y pernos (salvo los*

usados para finalidades especiales) tengan los filetes corriendo hacia la derecha?

Si miramos alrededor, quedaremos sorprendidos de que gran número de objetos hechos por el hombre sean simétricos, al menos en general, a primera vista. En algunos casos, objetos que parecen ser simétricos resulta que no lo son cuando se les examina cuidadosamente. Un par de tijeras, por ejemplo. Las hojas pueden cruzarse una con otra de dos maneras diferentes, la una imagen de la otra. La mayoría de las tijeras están diseñadas para ser usadas por personas diestras. Si usted es diestro verá lo difícil que es tener las tijeras en la mano izquierda y cortarse las uñas de la derecha. Esta dificultad se debe a algo más que al hecho de que usted es diestro; se trata de que usted está tratando de usar con la mano izquierda unas tijeras hechas para la mano derecha. Para que corten bien en su mano izquierda es preciso apretar sobre los ramales de manera sumamente incómoda. Por esta razón se han fabricado tijeras especiales para sastres zurdos y otros zurdos que necesitan emplear tijeras constantemente en su trabajo.

¿Es simétrico un auto? A primera vista, sí, pero cuando se consideran ciertos rasgos asimétricos, como la posición del volante, se ve que no lo es. El enantiomorfo de un coche americano es un coche con el volante a la derecha, como los autos ingleses, que marchan por el lado izquierdo de la carretera. ¿Es simétrico un avión lejano que usted ve en el cielo desde el suelo? Sí, excepto por la noche, cuando aparece la asimetría por virtud de la luz roja en el lado de babor (a la izquierda) y la luz verde en el lado de estribor (a la derecha). ¿Es simétrico un ventilador eléctrico? No, ya que sus aspas son partes de superficies helicoidales. Si las aspas fueran sustituidas por sus enantimorfos, el ventilador impulsaría el aire hacia atrás y no hacia delante. Los propulsores de los aviones y barcos son asimétricos por la misma razón. ¿Es simétrico un trozo de cuerda? Puede serlo. Examinémoslo de cerca. Si se compone de dos cabos retorcidos, desde luego no es simétrico. Cada cabo forma una hélice que aparece enrollado a la inversa cuando se refleja en un espejo.

EJERCICIO 4: *De los siguientes objetos, ¿cuáles son asimétricos?*

1. *Un palo de golf.*
2. *Un carrete de pescar.*

3. *Unos alicates.*
4. *Un abrelatas.*
5. *Un afilador de lápices.*
6. *Un tenedor para ensalada.*
7. *Una hoz.*
8. *Un saxofón.*
9. *Una llave inglesa.*
10. *Una bola de jugar a los bolos.*

Una curiosidad topológica muy conocida, la cinta de Moebius, es asimétrica. Si a una tira de papel se la da una media torsión y se pegan los dos extremos, se obtiene una superficie con un solo lado y una sola arista. Pero se le puede dar la media torsión a la derecha o a la izquierda. Retorcida de una manera se tiene una cinta de Moebius de un tipo. Retorcida de la otra manera, se obtiene su enantiomorfo, una cinta de mano contraria.

Un sencillo nudo "llano" hecho en un círculo cerrado de cuerda también posee "mano". La figura 12 muestra un par enantiomorfo de estos nudos. No importa cómo se manipule un nudo, no es posible cambiarlo en su imagen especular. ¿No se le ha ocurrido a usted que cuando cruza los brazos está efectivamente anudándose a sí mismo en un sencillo nudo? El siguiente experimento lo hará más claro:

Ponga un trozo de cuerda como de un metro de largo sobre

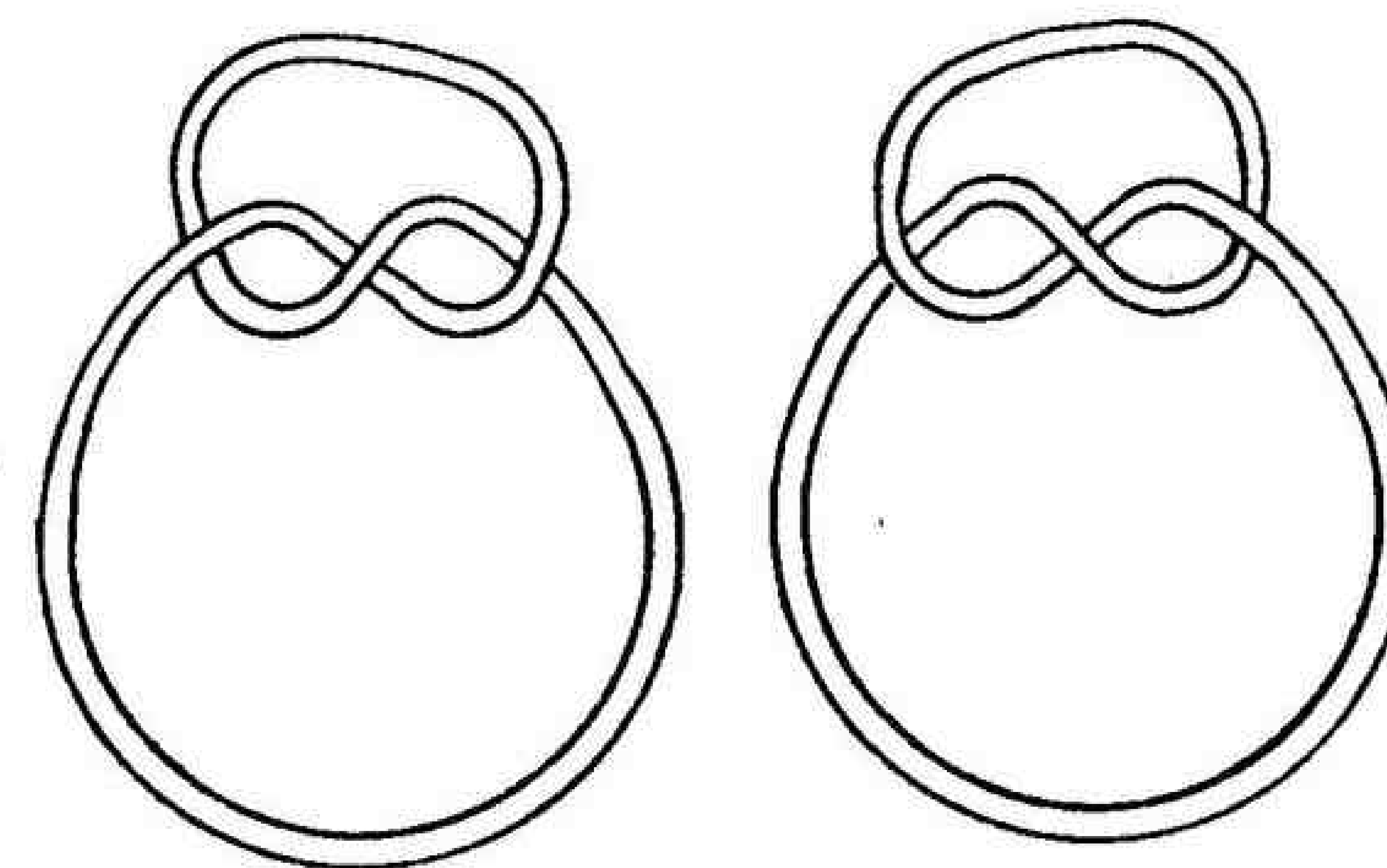


Fig. 12. Forma derecha e izquierda de un nudo llano.

una mesa. Cruce usted los brazos y coja un extremo de la cuerda con cada mano. Descruce los brazos. El nudo de sus brazos será transferido a la cuerda. La "mano" del nudo dependerá de la manera como usted haya cruzado sus brazos. Deje a un lado el nudo que acaba de hacer y repita el experimento con otro trozo de cuerda. Pero esta vez cruce lo brazos de modo contrario al anterior. El nudo resultante será la imagen en el espejo del nudo que se hizo antes. Si usted está frente a un espejo mientras cruza los brazos y hace el nudo de este modo, verá a su enantiomorfo en el espejo cruzar los brazos de modo contrario y hacer un nudo de "mano" contraria.

Tras esta breve introducción a la simetría por reflexión, acaso podamos responder ahora a la desconcertante pregunta formulada en el capítulo 1: ¿Por qué un espejo invierte la derecha y la izquierda y no la parte superior y la inferior?

La respuesta depende curiosamente del hecho de que nuestro cuerpo, como el de la mayoría de los animales, tiene sólo un plano de simetría. Este plano, claro está, pasa verticalmente a través del centro de nuestro cuerpo dividiéndolo en dos mitades idénticas como imágenes especulares. Esto es verdad únicamente de un modo general, a primera vista. Como hemos visto en el capítulo 1, en todo rostro hay pequeñas asimetrías. Internamente, desde luego, hay asimetrías importantes: el corazón a la izquierda, el apéndice a la derecha, etc. (En capítulos posteriores entraremos con cierto detalle en la asimetría de las formas vivientes.) Pero si se consideran de manera superficial, los animales y los hombres tienen lo que los biólogos llaman "simetría bilateral"; esto significa que el lado izquierdo es la imagen especular del lado derecho. No hay semejanza entre la parte frontal y la espalda, o entre la parte superior y la inferior. Por esta razón, y por el hecho de que todas las cosas gravitan uniformemente hacia abajo, construimos miles de objetos –sillas, mesas, edificios, coches, trenes, aviones, etc.– que tienen (de la misma manera, superficialmente, a primera vista) simetría bilateral. Cuando miramos a un espejo vemos un duplicado de nosotros mismos dentro de una habitación que duplica la habitación en que estamos. Cuando movemos la mano derecha vemos a nuestro gemelo en el espejo mover la izquierda. Describimos la inversión como una de derecha e izquierda porque es la terminología más conveniente para diferenciar una figura de simetría bilateral de su enantiomorfo. En un sentido estrictamente matemático, el espejo no ha invertido derecha e izquierda, sino que ¡ha invertido frente y espalda!

Para comprenderlo, imagine que está una vez más frente a un

enorme espejo que cubre toda una pared de la habitación. Está usted de frente, con su lado izquierdo hacia el oeste y el derecho hacia el este. Mueva su mano del oeste. La mano en el lado oeste del espejo se mueve. Guiñad el ojo este. El ojo del lado este del espejo también guiña. Su cabeza está arriba, sus pies abajo. La cabeza de su imagen está arriba, sus pies abajo. En otras palabras, el eje este-oeste y el eje arriba-abajo mantienen la misma orientación en el espacio de tres dimensiones. Lo que se ha invertido es el eje frente-espalda, el eje que corre de norte a sur, perpendicular al espejo. Usted está mirando al norte. Su gemelo mira al sur. Trace con tiza una línea norte-sur en el suelo de la habitación, perpendicular al espejo y señale puntos a su largo, de norte a sur, en orden correlativo: 1, 2, 3, y así hasta 10. En el espejo, los puntos a lo largo de la línea de tiza seguirán un orden retrógrado de norte a sur: 9, 8, 7, hasta 1. En un sentido estrictamente matemático, el espejo ha dejado invariables los ejes arriba-abajo y este-oeste, pero ha invertido el eje frente-espalda. Sólo porque usted imagina que está detras del espejo, mirando en dirección contraria, es por lo que usted habla de una inversión de derecha e izquierda.

Resulta aún más claro si usted ejecuta un cuarto de vuelta y queda mirando hacia el este, tocando con su lado izquierdo el espejo. Como antes, el espejo invierte la figura sólo a lo largo del eje perpendicular a él. A causa del modo en que usted se ha colocado, éste es ahora realmente su eje izquierda-derecha. *Ahora* sí puede usted decir, en un sentido estrictamente geométrico, que el espejo ha invertido sus lados derecho e izquierdo dejando invariables su eje arriba-abajo y su eje frente-espalda.

Imagine un espejo en el techo o en el suelo de la habitación. Otra vez, como siempre, el espejo invierte únicamente el eje perpendicular a su superficie, que ahora es el eje arriba-abajo. El espejo no altera las posiciones en el espacio tridimensional de sus lados derecho e izquierdo, su frente y su espalda. Sin embargo, le ha puesto a usted cabeza abajo. Pero si se imagina que está usted mismo en el espejo, sobre su cabeza, cuando mueva la mano izquierda verá que su gemelo cabeza abajo mueve la mano derecha. Aunque el espejo ha invertido únicamente el eje arriba-abajo, sigue siendo conveniente para usted, por ser una criatura con simetría bilateral, describir el mundo del espejo diciendo que derecha e izquierda han sido invertidas. No importa cómo el espejo voltee su mundo, usted se imagina dentro del mundo volteado y ve que sus lados derecho e izquierdo se han intercambiado; usted prefiere describirlo como una

inversión derecha e izquierda, y no como una inversión frente-espalda o arriba-abajo.

Podemos resumir lo anterior como sigue. Un espejo, cuando usted está frente a él no muestra en absoluto preferencia entre derecha e izquierda, entre abajo y arriba. El espejo *invierte* la figura, punto por punto, a lo largo del eje perpendicular a él. Tal inversión transforma automáticamente una figura asimétrica en su enantiomorfo. A causa de que somos bilateralmente simétricos, nos parece conveniente describir este proceso como una inversión derecha-izquierda. Pero se trata sólo de una manera de hablar, una convención en el uso de las palabras[1].

El truco de los dos espejos descritos en el capítulo 1, que dan imágenes no invertidas, consiste en que de hecho estos espejos invierten las figuras ¡a lo largo de *dos* ejes! Invierten frente y espalda como un espejo corriente, pero a diferencia de éste invierten también los lados derecho e izquierdo del observador. Esta doble inversión a lo largo de dos ejes diferentes produce una imagen de la *misma* "mano". Usted mira al espejo y observa que cuando usted guiña el ojo izquierdo, su doble en el espejo guiña el ojo situado más cerca del lado derecho del espejo. Como usted piensa que está dentro del espejo mirando en la dirección opuesta, cree que la imagen ha guiñado el ojo izquierdo y que no se ha producido ninguna inversión.

Después de dar a uno de esos espejos un cuarto de vuelta, continúa invirtiendo el eje frente-espalda, pero ahora invierte también el eje de arriba-abajo. Usted ve su rostro invertido, lo de arriba a abajo, pero no la derecha a la izquierda. Si usted se imagina invertido y dentro del espejo, verá, como antes, que cuando usted guiña el ojo izquierdo la figura del espejo guiña también el ojo izquierdo.

Esto puede parecerle todavía confuso. Tal vez tenga usted que leer varias veces los siete últimos párrafos y pensar en todo ello detenidamente antes de lograr comprender exactamente lo que un espejo corriente o los dos espejos perpendiculares hacen a los objetos asimétricos.

Con la finalidad de dar un poco de descanso a su cerebro, en el siguiente capítulo se explican algunos juegos y trucos divertidos y fáciles de hacer basados en algunas de las ideas expuestas hasta ahora.

4. Magia

Hay muchos juegos y trucos de magia que ilustran de forma amena los principios de simetría y asimetría expuestos en los capítulos anteriores. Uno de los mejores trucos de esta clase se realiza con un paquete de cigarrillos "Camel".

En uno de los lados del paquete de "Camel" están impresas en grandes mayúsculas las palabras CHOICE QUALITY (calidad escogida). Recordando la investigación de las simetrías de las letras mayúsculas que realizó en el capítulo 2, ¿ve usted lo que tiene de notable la palabra CHOICE? No sólo todas las letras son simétricas, sino que también todas tienen un eje horizontal de simetría. Por esta razón la palabra entera tiene un eje horizontal de simetría.[1] Si se presenta la palabra invertida ante un espejo, la imagen de la palabra en el espejo aparecerá inalterada. Esto no ocurre con la otra palabra, QUALITY. En QUALITY, tal como aparece en el paquete de cigarrillos, únicamente la letra I es simétrica en relación con un eje horizontal. Cuando se la sitúa ante un espejo, no importa cómo se haga girar el paquete, la imagen reflejada es ilegible.

Los prestidigitadores tienen una gran habilidad para sacar partido de estos hechos en un desconcertante truco de salón. Theodore H. Harwood, decano de la Facultad de Medicina de la Universidad de Dakota del Norte, siempre ha estado enamorado de este truco y le estoy agradecido por la excelente manera como lo presenta, tal como sigue:

«Todo el mundo sabe –dice usted a los espectadores– que al situar una palabra ante un espejo, éste invierte las letras. Mucha gente ignora que el celofán tiene esta misma propiedad, típica de los espejos, de invertir la letra impresa. Ahora bien, si una imagen reflejada se refleja por segunda vez es lo mismo que si no hubiera sido

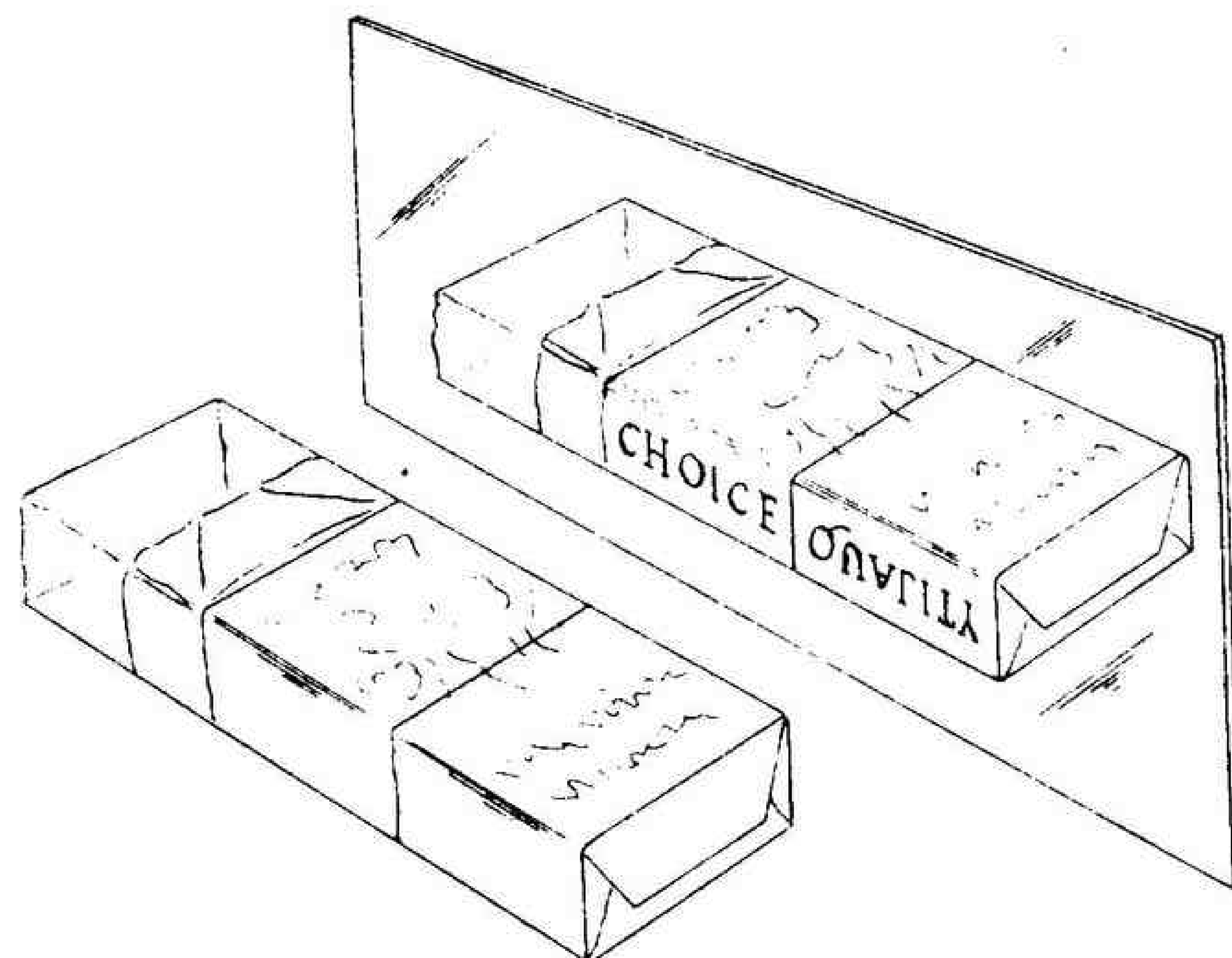


Fig. 13. ¿Por qué la palabra "choice" no se trastrueca?

reflejada en absoluto. Si dejamos que una palabra se refleje una vez mirándola a través del celofán, y después colocamos la palabra invertida ante un espejo, la palabra se reflejará por segunda vez y aparecerá en el espejo completamente normal. Vean ustedes lo que quiero decir.»

En este punto usted hace resbalar la funda de celofán por los lados del paquete de "Camel" hasta que cubra la palabra CHOICE y deje al descubierto QUALITY. Ponga usted este lado del paquete frente a un espejo, asegurándose de situar el paquete de modo que las palabras queden invertidas. La figura 13 muestra cómo aparece el paquete en el espejo.

«¿Ven ustedes? –continúa usted–. La palabra *choice*, que se ha reflejado dos veces, una en el celofán y otra en el espejo, aparece inalterada. Pero la palabra *quality*, al no reflejarse primero en el celofán, aparece invertida en el espejo, como cabría esperar.»

Es sorprendente el gran número de personas que admitirán esta falaz explicación. Si alguien insiste en examinar el paquete, corra usted el celofán sobre ambas palabras y déselo. Es probable que el otro mueva el celofán adelante y atrás antes de que al fin se haga la luz[2].



Fig. 14. ¿Por qué "Timothy" no se trastrueca?

Las letras con ejes verticales de simetría quedan inalteradas cuando se sitúan con el lado derecho hacia un espejo. Esto explica por qué, si se presenta la figura 14 a un espejo, el nombre del muchacho se refleja sin cambios en el espejo, mientras que el nombre de la muchacha se invierte. Usted puede decir a sus amigos, cuando se lo hace ver, que el espejo invierte las letras impresas en negro, pero no las blancas[3].

Es posible escribir cifras de modo que aparezcan como letras al reflejarse en un espejo. La figura 15 parece ser una suma errónea.

3414
340
74813
433 74813

Fig. 15. Un espejo corrige esta suma.

Pero si se mira frente a un espejo, verá usted cómo se corrige, leyéndola en lengua inglesa.

Muchas palabras se transforman en otras palabras cuando son reflejadas en posición normal. Por ejemplo, la palabra "bum" (holgazán) (con "b" minúscula) se transforma en "mud" (fango) en el espejo. Recorte estas tres letras en papel (cuanto mayores mejor) y péguelas en un espejo de pared o de tocador de modo que se lea "bum". Oscurezca la habitación y después ilumine las letras con una linterna. La sombra de las letras se proyectará en la pared situada a su espalda.

EJERCICIO 5: *Si usted vuelve la cabeza y lee la sombra de las letras en la pared, ¿verá la palabra "bum" o "mud"? Si mira al espejo y lee la palabra en la pared de la habitación como situada detrás del vidrio, ¿será "bum" o "mud"? Trate de responder a estas preguntas antes de hacer una prueba empírica.*

La simetría bilateral del rostro humano puede demostrarse poniendo el eje de un espejo de bolsillo (un espejo sin marco) verticalmente en el centro de una fotografía hecha de frente. El borde del espejo queda, claro está, sobre el eje de simetría de la foto. La parte expuesta del rostro, junto con la imagen del espejo, forma el rostro original. Sin embargo, a causa de las ligeras asimetrías de las facciones, el rostro no será exactamente el mismo.

Haga esta prueba del espejo con fotografías tomadas de frente de usted mismo, de sus parientes y amigos o de las personas famosas que aparecen en las revistas. A veces resulta divertido comprobar la diferencia entre un rostro formado por dos lados izquierdos de la foto (cuando el espejo mira a la izquierda) y un rostro compuesto con dos lados derechos (cuando el espejo mira a la derecha). A principios de siglo un grupo de psicólogos alemanes sostenía que los dos rostros compuestos, vistos de esta manera, representaban los dos lados básicos de la personalidad de una persona. Ningún psicólogo reputado toma esta opinión en serio, pero esto no tiene por qué impedir la broma de "analizar" a los amigos por el método del espejo, mediante el cual, si usted inclina ligeramente el espejo respecto a la vertical, puede transformar en una monstruosidad incluso el rostro más atractivo.

En los vestíbulos de los hoteles y de otros edificios, con frecuencia encontramos un pilar cuadrado rodeado de espejos por todas

partes. La simetría bilateral del cuerpo humano hace posible un truco sorprendente con ese pilar. Si se sitúa usted detrás de la columna, con la nariz apretada contra el borde de la esquina, dejando la mitad del cuerpo expuesta a la mirada de los espectadores, la mitad visible y su reflexión forman una imagen compuesta. (Muévase un poco hacia uno u otro lado hasta que sus espectadores le digan que la imagen compuesta parece normal.) Levante la mano visible y finja insuflar uno de sus dedos. Al mismo tiempo, alce su sombrero con la mano *oculta*. (Asegúrese de mantener el sombrero horizontalmente.) Parece exactamente como si su sombrero se hubiera elevado repentinamente en el aire. Sáquese el dedo de la boca y haga que el sombrero se pose lentamente en su cabeza. Muchas personas quedan sumamente desconcertadas por este sencillo juego.

Más todavía: levante la pierna visible. Las dos piernas de la imagen compuesta se alzarán como si saltaran a la cuerda. Al mismo tiempo haga girar los ojos rápidamente, en círculos. Para sus espectadores, uno de sus ojos gira en el sentido de las agujas de un reloj, y el otro, el reflejado, en sentido contrario.

Si pone usted el borde de un espejo sobre cualquier tipo de figura o dibujo, resultará una imagen compuesta con simetría bilateral. Acaso de niño hizo usted figuras con borrones de tinta. Simplemente deje caer unas gotas de tinta sobre una hoja de papel, doble el papel por la mitad de modo que la doblez pase por la tinta, y apriete las dos mitades de papel una contra otra. Cuando abra el papel tendrá un dibujo bilateralmente simétrico. En el conocido *test* de Rorschach, empleado por los psiquiatras como una ayuda para el diagnóstico, se utilizan figuras de borrones de tinta originariamente obtenidas de este modo. El pliegue en el papel señala, claro está, el eje de simetría del dibujo.

Si dos espejos formando una V se colocan sobre una figura o un dibujo, el resultado es una serie de reflexiones. Ajustando el ángulo hasta que sea un submúltiplo de 180 grados, se pueden formar divertidos dibujos con un número par de ejes de simetría. Si el ángulo es de $180:2 = 90$ grados, el dibujo tendrá dos ejes de simetría, no suficientes para hacerlo interesante. Un ángulo de $180:3 = 60$ grados produce la sorprendente figura hexagonal de un copo de nieve con tres ejes de simetría. Observe que las reflexiones se alternan, cambiando de "mano", cuando usted da vueltas alrededor del dibujo. Ponga los espejos formando un ángulo de 60 grados con una ilustración en color de una revista, y después deslícelos lentamente por la página, manteniendo siempre el mismo ángulo. Las figuras

hexagonales abstractas cambiarán rítmicamente en dibujos diferentes, pero conservando siempre su bella simetría hexagonal. La mayoría de los calidoscopios están hechos con espejos colocados en ángulo de 60 grados que forman dibujos similares al reflejar motivos casuales creados por trozos coloreados de cristal.

Hay una nueva forma de calidoscopio, llamado "teleidoscopio". En lugar de contener trozos de vidrios de colores, tiene una lente convexa en cada extremo del calidoscopio, lo que lo convierte en un telescopio. Toda escena mirada a través del teleidoscopio se refleja siete veces en dos espejos colocados formando un ángulo de 180:4 = 45 grados. En este caso el dibujo resultante es octogonal, con cuatro ejes de simetría.

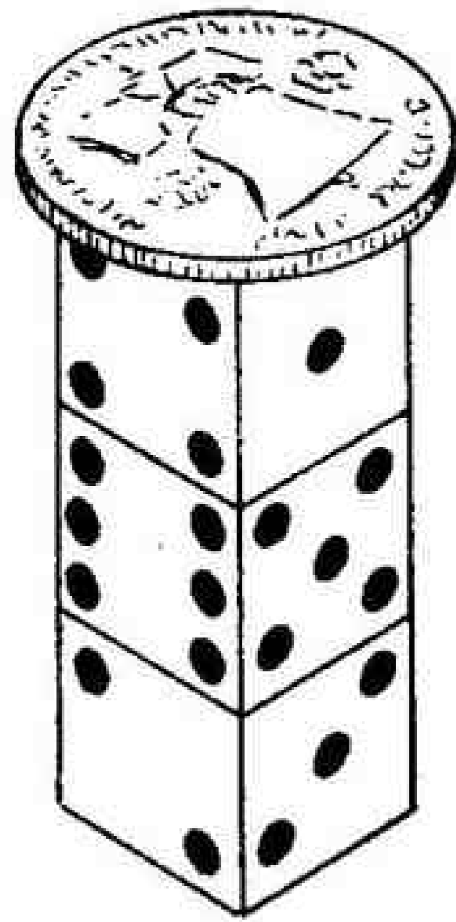


Fig. 16. ¿Puede usted decir cuál es el número de la cara superior de cada dado?

Con dos o más dados corrientes, se puede poner en práctica un juego de adivinanza sobre las estructuras de izquierda y derecha. Si usted apila tres dados como se ven en la figura 16, y cubre la pila con una moneda, quedarán visibles cuatro caras de cada dado (mirando alrededor de la pila) y las otras dos quedarán ocultas. ¿Puede acertar correctamente el número que hay en la cara superior de cada dado de la figura? Dos caras opuestas de un dado suman en total siete, de modo que es fácil deducir que la cara superior del dado inferior tiene que ser 6 ó 1. De modo semejante, la cara superior del dado mediano tiene que ser 4 ó 3 y la del dado superior 5 ó 2. ¿Cómo puede usted decir cuál de cada par de números dígitos es el correcto?

El método se basa en el hecho de que las caras del dado sólo

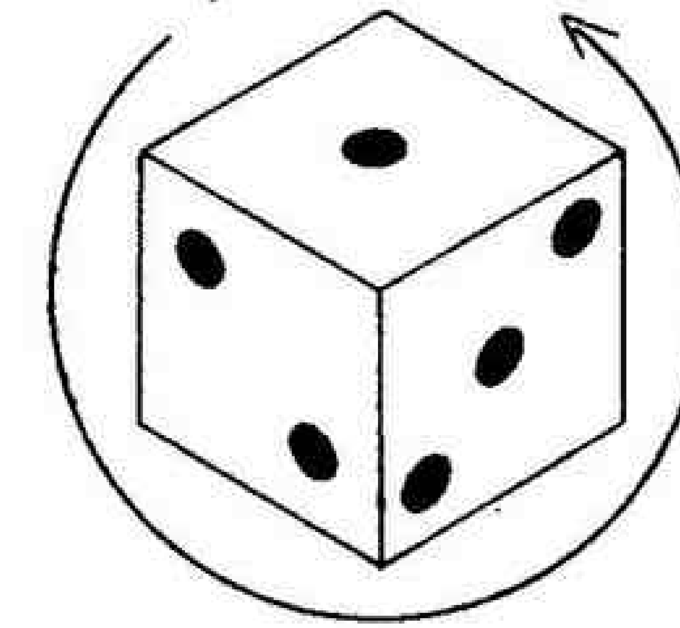


Fig. 17. Todos los dados modernos están hechos a la mano izquierda.

pueden ser numeradas de dos modos para que cada dos caras opuestas sumen siete. Un modo es la imagen especular del otro. Si usted tiene un dado como el de la figura 17, con las caras 1, 2 y 3 hacia usted y el 1 en la cara superior, verá que los tres dígitos, en orden correlativo, van en dirección opuesta a las agujas del reloj, como indica la flecha.

Todos los dados modernos están hechos de este modo. En épocas pasadas los dados se hacían unas veces de un modo y otras de otro. Los dados cúbicos cuyas caras opuestas suman siete se remontan nada menos que al antiguo Egipto, donde se hacían de las dos formas, a mano derecha y a mano izquierda.

Una vez que se sabe que todos los dados modernos están hechos a la mano izquierda, no es difícil decir el número de las caras superiores en una pila de dados rematada por una moneda. Basta mirar las dos caras de cada lado y representarse visualmente dónde deben estar el 1, el 2 y el 3. Con un poco de práctica, teniendo en cuenta que las caras opuestas suman siete y que el 1, el 2 y el 3 van en sentido contrario a las agujas del reloj, no resulta difícil.

EJERCICIO 6: *Diga cuáles son las caras superiores de los dados de la figura 16.*

Ni una persona entre mil es capaz de acertar las caras superiores de los dados así apilados. Yo he visto a jugadores ejecutar este truco en los casinos, con seis o más dados que alguien apila al azar mientras el jugador está de espaldas. El jugador echa una mirada a la pila e inmediatamente dice las caras superiores, mientras los nú-

meros se comprueban uno cada vez, quitando el dado situado en lo alto de la pila. Por lo general la hazaña causa sensación y provoca confusas discusiones sobre cómo están ordenados los números en los dados.

Si usted ensaya este truco con sus amigos les verá divertidos, con un gustillo matemático que aumenta su interés. Pero tenemos cosas más importantes que considerar. El siguiente capítulo trata sobre el papel de la simetría de reflexión en la pintura y, lo que es más sorprendente, en la música y la poesía.

5. Arte, música, poesía y números

La simetría de reflexión facilita uno de los métodos más antiguos y sencillos de crear un dibujo divertido. Las figuras que los niños hacen con borrones de tinta, de las que hemos hablado en el capítulo anterior, son un ejemplo de ello. Cuando se le enseña por primera vez a un niño el modo de hacer una, suele gritar de alegría al desplegar la hoja de papel y ver el dibujo bilateralmente simétrico, sobre todo si la figura está hecha con pinturas de colores en vez de tinta negra. ¿Por qué el niño piensa que estas figuras son "bonitas"? La respuesta obvia es que al niño le agrada el sentido de orden y armonía impuestos a un dibujo hecho al azar. ¿Se debe a que ve tanta simetría bilateral en el mundo que le rodea? Nadie lo sabe, aunque parece razonable suponer que la simetría bilateral de la naturaleza, que es una gran parte de su experiencia, le condiciona para responder con placer a este tipo de dibujo. La simetría bilateral es corriente en el arte de las culturas primitivas y en la temprana historia de la pintura. Fue un aspecto esencial del estilo del primitivo arte egipcio. Las pinturas religiosas de la Edad Media fueron realizadas en muchos casos con una fuerte simetría bilateral.

Para el gusto moderno, la composición de una de esas pinturas es insulsa, debido a que la simetría es demasiado obvia (aunque parece haberse producido un resurgimiento temporal de ese estilo en la obra de algunos artistas *pop*, así como en las pinturas geométricas de los nuevos abstraccionistas). Sin embargo, si mira a su alrededor verá infinitos ejemplos de figuras y diseños bilateralmente simétricos en objetos hechos por el hombre. No me refiero sólo a los objetos que poseen esa simetría por razones de conveniencia (puertas, ventanas, sillas, etc.), sino a formas que se han hecho simétricas ante todo para hacerlas agradables. Jarrones, pies de lámparas, candelabros, ventanas emplomadas, adornos del árbol de Navidad,

pendientes, broches para la solapa... la lista es infinita. Los motivos de las prendas de vestir, de los papeles de pared, de las cortinas y pavimentos, suelen ser una repetición de figuras bilateralmente simétricas. Marcas de fábricas y emblemas familiares –la cruz y la flor de lis, por ejemplo– suelen tener simetría bilateral. Como señala Hermann Weyl en su breve libro *Symmetry* (Princeton University Press, 1952)*, la semejanza con la naturaleza a veces se sacrifica por completo para obtener una duplicación exacta a cada lado de un eje vertical de simetría. Un ejemplo notable es el águila de dos cabezas en el escudo de armas de la Rusia zarista y de la antigua monarquía austro-húngara.

En marcado contraste con el arte occidental, e incluso con el chino, el arte japonés busca evitar las simetrías. Como señala Everett F. Bleiler en su introducción a *The Book of Tea* de Kakuzo Okakura (Dover, 1964), la noción de perfección en el Tao y el Zen, que tan vigorosamente ha influido en el arte japonés, pone énfasis en el crecimiento dinámico; los motivos y diseños simétricos, por el contrario, sugieren ideas de repetición y conclusión. La aversión de los japoneses a la simetría se extiende incluso al ritual de servir el té. «Al colocar un jarro sobre un quemador de incienso, en el tokonoma», escribe Bleiler, «se ha de tener cuidado de no situarlo en el centro exacto, para que no divida el espacio en dos mitades iguales.»

En el arte occidental, cuando hay dominancia de simetría bilateral los motivos y formas tienen casi siempre ejes de simetría verticales. Estamos tan acostumbrados a que en la naturaleza los ejes de simetría sean verticales, que nos sentiríamos vagamente incómodos, sin saber de cierto por qué, si los motivos de determinados empapelados, cuyo eje de simetría es vertical, se hicieran girar 90 grados. Hay, no obstante, escenas naturales que *sí* tienen un eje de simetría horizontal: aquéllas en las que los árboles u otros objetos se reflejan en las plácidas aguas de un lago o un río. Cuando vemos pinturas con este tipo de paisaje no experimentamos ninguna desazón; la simetría resulta grata. (Véase al respecto la maravillosa portada del *New Yorker* de 23 de julio de 1966, creada por Saul Steinberg.) Por razones parecidas, pocas veces los broches de solapa tienen un solo eje de simetría horizontal, a menos que imiten algún pez u otro objeto natural que habitualmente se vea en esa posición.

La extraordinaria preferencia que la naturaleza muestra por los ejes verticales de simetría se debe, desde luego, al simple hecho de

* Edición española: *La simetría*, Ediciones de Promoción Cultural, Barcelona, 1975.

que la gravedad es una fuerza que actúa en línea recta de arriba a abajo. Una consecuencia de ello es que las cosas tienden a extenderse igualmente en todas las dimensiones horizontales. El agua se extiende formando lagos, de superficie horizontal. Un lago puede extenderse indistintamente al Norte o Sur, al Este o al Oeste, pero no puede expandirse en el aire. Por esta razón, si se toma la foto de un lago y se invierte el negativo para obtener un grabado en que la derecha sea la izquierda y la izquierda la derecha, sigue pareciendo un lago corriente. Pero si usted pone la foto cabeza abajo, el agua está violando la ley de la gravedad y ve usted algo que no es posible que ocurra en la naturaleza. Un árbol es simétrico, como lo es un cono: tiene un número infinito de ejes verticales de simetría, pero ninguno que sea horizontal. También en este caso la gravedad proporciona una explicación obvia. El árbol crece hacia arriba, en contra de la gravedad. Tiene las raíces en el suelo y las hojas en el aire. Esto distingue claramente la copa de la base. A causa de que está enraizado en el suelo y no se mueve de un lugar a otro como los animales, no tiene frente ni espalda, derecha ni izquierda. La reflexión de un árbol en el espejo, cuando tenemos el espejo en posición vertical, parece exactamente como el árbol.

De hecho, es difícil decir si una fotografía de *cualquier* escenario natural tiene trastocadas la derecha y la izquierda, a menos que contenga algunos objetos bilateralmente *asimétricos* hechos por el hombre, como un signo impreso sobre ella, o calles con autos circulando por un lado de la calzada. Pero si usted refleja una foto a lo largo de un eje horizontal –que produce el efecto de invertirla de arriba a abajo–, se ve inmediatamente que algo está mal. En *The New Yorker* del 5 de mayo de 1962 apareció un dibujo donde se veía a un hombre que acababa de levantarse de la cama, levantando el visillo de una ventana del dormitorio. El paisaje, visto a través de la ventana, estaba del revés. El dibujo es humorístico, porque esta clase de inversión es sumamente absurda; si la escena vista a través de la ventana estuviera invertida de izquierda a derecha parecería completamente natural.

Algunas veces los artistas y caricaturistas se divierten dibujando figuras patas arriba, figuras que se transforman en otras cuando se las invierte. La sorpresa que se experimenta cuando una de esas figuras es invertida se debe al hecho de que nunca esperamos que una figura se parezca a algo cuando se la invierte. La inversión de derecha e izquierda es tan corriente, que resulta fácil imaginar lo que parecería trastrocado o *flopped*, como les gusta decir a los artis-

tas gráficos. En cambio, es casi imposible estudiar una figura cabeza abajo e imaginar a qué se parecerá al darle la vuelta.

Cuando yo estaba en la universidad, me encontré una vez viviendo en una habitación decorada con reproducciones de cuadros que me producían intensa aversión. Para sustraerme al asunto que representaban volví las pinturas cabeza abajo. De este modo no se percibía el asunto, y sólo quedaban los colores y la composición, que me parecieron agradables. Desgraciadamente, mi patrona, que había comprado los cuadros y le gustaban, se opuso tan enérgicamente que tuve que volverlos a su posición normal. El quid de la anécdota es que la inversión de una pintura realista, sea haciéndola girar 180 grados o reflejándola en un espejo puesto horizontalmente sobre ella (las dos cosas no son exactamente la misma), cambia sin duda el "valor estético" de la pintura. ¿Hay algún cambio en el valor estético de un cuadro cuando se le refleja de derecha a izquierda? Se está tentado de contestar que no, pero, pensándolo mejor, sí puede haber un sutil cambio, suscitado por el hecho de que la mayoría de los que contemplan una obra de arte, al menos en las naciones occidentales, están acostumbrados a leer de izquierda a derecha. Algunos críticos de arte arguyen que una pintura pierde algo de su valor cuando está *flopped*, trastrocada.

Hay alguna prueba empírica para sostener esta opinión. David B. Eisendrath, hijo, un fotógrafo de Nueva York, preparó una serie de cincuenta fotografías, cada una de las cuales tenía dos reproducciones, la una imagen especular de la otra. Los pares eran mostrados de uno en uno a varias personas, a las que se preguntaba qué foto de cada par les gustaba más. Escenas que tenían una simetría global derecha-izquierda fueron preferidas por igual tanto en una forma como en la otra; pero cuando la escena mostraba una composición con fuerte asimetría, hubo un acuerdo del 75 por 100 de los espectadores en escoger una foto en vez de su imagen gemela. Todas estas personas leían de izquierda a derecha. Cuando las mismas fotos fueron mostradas a personas que sólo leían hebreo, que va de derecha a izquierda, se registró una tendencia a preferir las imágenes especulares, inversas, de las fotos antes preferidas por quienes leían de izquierda a derecha.

Estas pruebas, y los trabajos en la misma línea de los psicólogos alemanes (en particular Heinrich Wölfflin y Theodora Haack), sugieren que puede haber alguna pérdida de valor estético cuando ciertas pinturas son transpuestas de izquierda a derecha. Aún así, la pérdida no es grande. Usted puede hacer el sencillo experimento de

hojear un libro que reproduzca muchos cuadros (es preferible que sean pinturas que usted no haya visto antes), mirando directamente cada pintura y después observando en un espejo si nota alguna pérdida o aumento del placer estético.

Cuando una serie de dibujos cuenta una historia, como en las tiras de historietas, sin duda el orden de izquierda a derecha tiene una gran influencia sobre la manera cómo está dibujada cada escena. Por lo general, la acción va de izquierda a derecha, y el personaje que habla primero debe estar situado a la izquierda para evitar que los globos con el texto sean leídos en orden indebido. En los *makimono* japoneses, una larga tira en la que los dibujos cuentan una historia, la acción va en dirección opuesta, debido a que la tira se desenrolla de derecha a izquierda.

Es fácil invertir una película cinematográfica de izquierda a derecha. Se puede estar contemplando la película durante algún tiempo antes de darse cuenta de que está del revés: acaso se vean las letras impresas de un anuncio, o a dos personas estrechándose la mano izquierda. Las estatuas son algunas veces simétricas bilateralmente (el general montado en su caballo). En arquitectura, la simetría bilateral es demasiado corriente para merecer comentario. En la danza, la simetría bilateral desempeña también un importante papel. Las Rockettes del *Radio City Music Hall*, siguen a veces una rutina en la cual las versiones a la derecha y a la izquierda de casi todos los pasos alternan de principio a fin.

Además de volverlas del revés, transponiendo así sus lados derecho e izquierdo, las películas de cine pueden también pasarse marcha atrás, invirtiéndolas, por así decirlo, en su dimensión temporal. Cobran entonces rasgos absurdos, como de pesadilla: la gente camina de espaldas por las calles, los nadadores son expulsados del agua y lanzados hacia el trampolín, etc. ¿Ocurriría lo mismo al pasar marcha atrás la película de un ballet? Ver bailar hacia atrás puede resultar bastante agradable, aunque un tanto grotesco, sobre todo si el baile está sincronizado con música interpretada en el sentido progresivo habitual. ¿Podría un hábil coreógrafo idear un ballet palindrómico con simetría bilateral respecto del tiempo, es decir, una danza que resultase casi idéntica al filmarla y al pasar después la película de fin a principio?

Se podría suponer que la simetría especular no desempeña ningún papel en música, pero si imaginamos las notas como diseños sonoros que fluyen a lo largo de la única dimensión del tiempo, entonces una imagen especular de una melodía se obtiene simplemen-

te ejecutando la música de fin a comienzo. Esto se puede hacer fácilmente con una cinta magnetofónica. En la mayoría de los casos, tal retrogradación produce un embrollo de sonidos sin sentido, que no gusta escuchar. La música de piano suena extrañamente como música de órgano cuando se la invierte en el tiempo. (¿Puede usted adivinar por qué?) Durante el siglo XV, muchos compositores crearon "cánones" (composiciones de dos o más melodías interpretadas simultáneamente), en los cuales una melodía es la otra melodía al revés. Muchos de los más grandes compositores han empleado la inversión de las melodías para lograr diversos efectos de contrapunto.

La música también puede invertirse de arriba a abajo, de manera que las notas altas se conviertan en bajas, y viceversa. Si usted imagina una Alicia sin invertir al otro lado del cristal del espejo, sentada a un piano y ejecutando una melodía familiar, esta es la clase de música que produciría el piano invertido. Usted puede hacer lo mismo si tiene acceso a una pianola, sin más que invertir el rollo con la partitura para transponer las notas altas y bajas, y hacer después girar el rollo hacia delante del comienzo al fin. En un canon humorístico, que suele ser falsamente atribuído a Mozart, la segunda melodía presenta ambos tipos de inversión; es decir, era la misma primera melodía puesta, "patas arriba" y leída de atrás adelante. Así, tan sólo es preciso imprimir la partitura de la única melodía. Una persona canta leyendo la partitura en posición normal, mientras otra lo hace con el papel del revés. Un ejemplo moderno de esta clase de canon, compuesto por Winthrop Parkhurst, aparece en su libro *The Anatomy of Music* (Knopf, 1930, pág. 137).

También la poesía puede ser imaginada como una serie de sonidos ordenados a lo largo de la simple dimensión temporal. En esto no hay problema, pero muchos hábiles poetas han empleado deliberadamente la simetría por reflexión para obtener efectos sonoros especiales. Por ejemplo, Robert Browning, en su conocido y hermoso poema lírico "Meeting at Night", empleó las rimas según el esquema *abccba*, de forma que la reflexión de los sonidos diera la sensación de los movimientos de las olas del mar.

Si se deja de lado la forma de las letras y se consideran las frases como series de símbolos ordenados a lo largo de una línea recta, se pueden producir toda clase de efectos divertidos al reflejar los símbolos en un espejo. Las palabras palíndromas son palabras de simetría bilateral, que suenan lo mismo leídas en las dos direcciones, como *radar, rodador, somos. Malayalam* es un lenguaje hablado en la India. *Wassamassaw* es el nombre palíndromo de un pantano del

condado de Berkeley, en Carolina del Sur. Una palabra "somordnílap" ("palíndromos" leída al revés) es un palabra que al invertirla se convierte en otra, como Roma (amor) o raza (azar). Cuando una frase entera tiene simetría bilateral, se llama también palíndromo. Se han compuesto miles de notables palíndromos. (El lector curioso puede encontrar una buena colección de algunos palíndromos modernos, poco conocidos, en las páginas 342-345 del libro de C. C. Bombaugh *Oddities and Curiosities of Words and Literature* (Dover, 1961). Uno de los mejores es:

*A man, a plan, a canal-Panama!**

Un número palindrómico, o capicúa, es un número que sigue siendo el mismo al leer sus cifras en orden inverso. El último año palindrómico fue 1881; también es el mismo cuando se le pone del revés o se le coloca ante un espejo. (1961 es invertible, pero no palindrómico.) El próximo año palindrómico será, por supuesto, el año 1991. Si se suma a un número cualquiera el número obtenido invirtiendo el orden de sus dígitos, y va repitiendo la operación, ¿llegará usted a obtener una suma palindrómica? Así 89 + 98 es 187, que no es un palíndromo. Y 187 + 781 es 968, que tampoco es palindrómico. Siga usted y con el tiempo (en este caso después de 24 sumas), llegará al palíndromo 8.813.200.023.188.

Se ha conjeturado que con este procedimiento, aplicado a cualquier número entero, se obtiene un palíndromo al cabo de un número finito de operaciones. Charles W. Trigg, un matemático de California, ha puesto en duda la verdad de esta conjetura. Ha encontrado 249 enteros, todos menores de 10.000, que no dan palíndromo después de 100 sumas. El menor de estos enteros es 196. Otro matemático californiano, Dewey C. Duncan, ha demostrado que el procedimiento no siempre da lugar a un palíndromo en el sistema binario; por ejemplo, cuando se aplica al número binario 10110. Para probar que este número nunca produce un palíndromo, vea el problema 5 del libro de Roland Sprague *Recreation in Mathematics* (Blackie and Son, 1963). En 1977, Heiko Harborth demostró (en *Mathematics* Magazine, vol. 46, 1973, pp. 96 y sigs.) que la conjetura es falsa en todo sistema de numeración cuya base sea potencia de 2. Para todas las demás bases, la conjetura está por resolver. En lo que a la base 10 se refiere, en 1975 Harry J. Saal, del Is-

* En español tenemos uno muy conocido: "Dábale arroz a la zona el abad." *(N. del T.)*

rael Scientific Center, llevó a cabo la operación con el número 196, sin llegar a obtener un palíndromo después de 237.310 sumas.

Gustavus J. Simmons ha escrito dos artículos acerca de los números palindrómicos o capicúas que son potencias de otros números (*Journal of Recreational Mathematics*, abril de 1970 y enero de 1972). Hay infinitos palíndromos que son cuadrados, cubos y cuartas potencias de otros números, pero se ignora si los hay que sean potencias de grado mayor que 4. El más bajo de los números palindrómicos o capicúas cuya raíz cuadrada no es también capicúa es $676 = 26^2$. El mayor de los números no capicúas de los que se sabe que tienen cuadrado palíndromo es 3.069.306.930.693.

Tan escasos son los números palindrómicos cubo perfecto de números no capicúas, que sólo se conoce uno: $10.662.526.601 = 2.201^3$. No se conoce ningún palíndromo que sea *n*-ésima potencia (*n* mayor que 3) cuya raíz *n*-ésima no sea palindrómica.

También han merecido alguna atención los números primos palindrómicos. Los números primos son aquellos números distintos de 1 que no son exactamente divisibles por ningún otro número natural, exceptuados él mismo y la unidad. Un número primo palindrómico tiene que comenzar y terminar por 1, 3, 7 ó 9, y no puede tener un número par de dígitos mayor de dos (porque entonce sería múltiplo de 11). Casi todas las cuestiones de interés relativas a los números primos palindrómicos están por responder. Ni siquiera está demostrado que exista una infinidad de tales números. Se llama números primos "reversibles" a los que, sin ser capicúas, dan lugar a otro número primo al escribirlos de fin a principio. De este grupo tampoco se sabe si es finito o infinito.

Norman Gridgeman, de Ottawa, ha observado que los números primos palindrómicos, a menudo se presentan en parejas que son idénticas excepto el dígito central, que difiere en 1. Por ejemplo, entre los primeros 47 primos palindrómicos hay una docena de éstas:

2	919	13831
3	929	13931
181	10501	15451
191	10601	15551
373	11311	16561
383	11411	16661
787	12721	30103
797	12821	30203

¿Hay un número infinito de tales parejas? Gridgeman supone que sí, pero hasta ahora nadie lo ha probado.

De vez en cuando se escriben poemas palindrómicos en los cuales el orden de las palabras es exactamente el mismo en ambas direcciones, pero en raras ocasiones se componen poemas palindrómicos en los que las letras sean las unidades básicas.

Frederick Brown tiene el mérito de haber escrito un brevísimo relato que es palindrómico en las palabras, no en las letras; esto es, que dice lo mismo si se lee del principio al fin que del fin al principio, repitiendo en orden inverso las palabras enteras, no las letras[1].

6. Galaxias, soles y planetas

Todo el Cosmos –el Universo de espacio y tiempo y todas las cosas que contiene– parece tener, a grandes rasgos, la simetría de una esfera. Nosotros vivimos en un planeta que gira alrededor del Sol. El Sol es una de las cien mil millones de estrellas que forman nuestra galaxia. La galaxia es del tipo espiral, con largos brazos que salen del centro como los ígneos brazos de un colosal molinete. Nuestro sistema solar está en uno de estos bazos, a más de treinta mil años-luz del centro de la galaxia. (Un año-luz es la distancia que recorre la luz en un año, unos diez billones de kilómetros.) La galaxia misma pertenece a un grupo de galaxias. Más allá de este grupo, a distancias inconcebibles por lo inmensas, el espacio está sembrado de otros grupos de galaxias. Los astrónomos tienen buenas razones para pensar que estos grupos se alejan unos de otros, de modo que el Universo entero se está expandiendo como un gigantesco globo que se hinchara.

Según la teoría llamada del Big Bang (gran explosión), la cantidad de materia en el Universo es finita. Hace miles de millones de años estaba concentrada en una enorme y densa masa. La masa estalló, y su explosión originó la evolución del Universo. Según otra teoría, la llamada teoría estacionaria, la cantidad de materia del Universo es infinita. Cuando se expande, está creándose continuamente materia para evitar que el Universo se enrarezca. En ambas teorías, el Cosmos tiene simetría global.

Consideremos por un momento el Universo en expansión de la teoría del Big Bang. El espacio puede ser infinito, pero el Universo material –las estrellas y todos los demás cuerpos astronómicos que se desarrollaron después de la primitiva explosión– es finito y esférico. Imagine un enorme plano que corte este Universo por su centro.

En cualquier dirección que lo corte, el aspecto del Universo a un lado del plano es igual al del otro lado. En otras palabras, el Universo material tiene la simetría de una esfera.

En la teoría estacionaria, el Universo material se extiende al infinito en todas direcciones. No *existe* un centro. En este Universo, usted puede imaginar un plano infinito que lo corte en cualquier dirección a través de cualquier punto que escojamos. De nuevo, los astrónomos que aceptan esta teoría no tienen ninguna razón para pensar que el Universo a un lado del plano sería distinto en términos generales que al otro lado. Tal Universo tendría la simetría de un espacio infinito, homogéneo, de dimensión 3. Como en el modelo del Big Bang, no hay indicios de que el Universo tenga algún tipo de asimetría[1] derecha-izquierda, a gran escala.

¿Son también simétricas las galaxias? Sí; incluso las galaxias espirales son simétricas cuando las consideramos como estructuras tridimensionales. Es verdad que una espiral *encerrada en un plano* es asimétrica. No hay modo de girar esa espiral para transformarla en su imagen especular sin hacerla girar fuera del plano. Pero las galaxias espirales no son figuras planas. Vistas de perfil, tienen la forma de una lente como dos platos puestos cara contra cara. El plano que separa los "platos" es un plano de simetría que corta la galaxia en dos mitades, una imagen especular de la otra. Como vimos en anteriores capítulos, esto significa que una galaxia espiral puede ser superpuesta a su imagen especular. Basta dar la vuelta a una de las imágenes de modo que las dos imágenes de la espiral vayan en la misma dirección. Naturalmente, estamos considerando todavía tan sólo los aspectos generales de la estructura galáctica. Pero si tenemos en cuenta las distintas estrellas que componen la galaxia, sus tamaños y naturaleza, y los dibujos que forma cada una de ellas con otra, entonces la galaxia no se puede superponer a su imagen especular.

Existe un criterio erróneo según el cual una galaxia no es superponible a su imagen reflejada ni siquiera globalmente, a saber, cuando tenemos en cuenta los polos norte y sur de su campo magnético. Es sabido que nuestra galaxia tiene un campo magnético muy débil. No se conoce la exacta estructura del campo, pero es probable que tenga un eje magnético que coincida exactamente con el eje de rotación. Si tenemos en cuenta los nombres que damos a los extremos de ese eje magnético, entonces el "lado" izquierdo de la galaxia no es igual al "derecho". La galaxia no se puede superponer a su imagen especular. Si damos la vuelta a una imagen hasta

que sus brazos espirales coincidan con los brazos espirales de su enantiomorfo, el polo norte magnético de una imagen coincidirá con el polo sur magnético de la otra. En realidad, como veremos más adelante, ésta no es una verdadera asimetría. Únicamente lo parece porque nosotros hemos rotulado los extremos del eje magnético. El propio campo magnético es simétrico, pero esto no quedará claro hasta que, en el capítulo 19, examinemos la naturaleza del magnetismo.

Una seudoasimetría semejante existe con respecto a las estrellas, como por ejemplo, nuestro Sol. Cuando se considera sólo la forma del Sol, es evidente que éste tiene una simetría esférica. Es cierto que el Sol gira sobre su eje, pero esto no impide que sea superponible a su gemelo especular. Todo lo que tenemos que hacer es girar una imagen poniéndola del revés, invirtiendo la orientación de su eje de rotación, y las dos imágenes coincidirán punto por punto, girando ambas en la misma dirección. Sin embargo, se sabe que el Sol tiene un campo magnético. Su eje magnético, como el eje magnético de la Tierra, se corresponde exactamente con el eje de rotación. Si llamamos a los extremos "norte" y "sur", y no invertimos estos nombres en la imagen especular del Sol, no se puede hacer coincidir el Sol rotatorio con su reflexión especular. Si los ejes coinciden, los giros no; si los giros coinciden, los ejes no. Es curioso que, por razones hasta ahora inexplicables, en ocasiones el eje magnético del Sol da un completo salto mortal: el polo norte se convierte en polo sur, y viceversa. Puesto que el Sol no cambia la dirección de su giro, este salto significa que (hasta cierto punto) el Sol cambia de "mano" y se convierte en su propio enantiomorfo.

¿Qué pasa con los planetas? Tienen, como el Sol, simetría esférica y, por tanto, se les puede superponer a sus imágenes especulares, siempre que no se tengan en cuenta las irregularidades de su superficie o la seudoasimetría de su campo magnético. La Tierra, claro está, tiene campo magnético, con polos magnéticos norte y sur que no están lejos de los polos norte y sur del eje de rotación del planeta. Además de la seudoasimetría introducida por su campo magnético, la Tierra tiene una forma que ahora se sabe que es ligeramente (muy ligeramente) semejante a una pera. Hasta hace poco se creía que la Tierra era un esferoide achatado, una esfera ligeramente achatada en los polos, pero mediciones precisas realizadas en los últimos años indican que el achatamiento es algo mayor en el Polo Sur que en el Polo Norte. Si se tiene en cuenta esta variación, entonces la Tierra rotatoria es como una peonza, en el sentido de

que la forma de la mitad superior no es idéntica a la de la mitad inferior, y (dejando a un lado los nombres dados a los extremos de su eje magnético) no es superponible a su imagen especular. Si no fuera por el *giro* no habría asimetría. Si colocamos una peonza ante un espejo, veremos que su forma es la misma que la de su imagen especular. Pero tan pronto como hay giro, adquiere "mano". Una peonza que gire en el sentido de las agujas del reloj (cuando se la mira desde arriba) tiene un gemelo especular que gira en sentido contrario. Si se intenta hacer que los giros coincidan invirtiendo cabeza abajo una imagen, las dos imágenes no se confundirán, a causa de que la parte superior de una imagen estará en la parte inferior de la otra, y en una peonza estas dos partes no son iguales.

En la superficie de cualquier cuerpo astronómico giratorio se registran toda clase de asimetrías interesantes, de "mano izquierda" en un hemisferio y de "mano derecha" en el otro. Por ejemplo, si usted está en un avión en el hemisferio Norte, volando en línea recta hacia el Polo Norte, el piloto tendrá que corregir la marcada tendencia del avión de desviarse hacia la derecha, considerada cuando usted mira hacia delante. Si el avión está en el hemisferio Sur, en dirección al Polo Sur, la desviación será hacia la izquierda. Esta desviación es un ejemplo de lo que los físicos llaman el efecto Coriolis, por el nombre de Gaspard Gustave de Coriolis, un ingeniero francés de principios del siglo XIX que fue el primero en estudiarlo a fondo. El efecto es consecuencia del hecho de que un objeto, en diferentes puntos de la superficie terrestre, es transportado por el espacio a diferentes velocidades. Si usted está en el Ecuador, la rotación de la Tierra le hace recorrer un círculo de unos 40.000 km en veinticuatro horas, a una velocidad de 1.660 km por hora. Al trasladarnos hacia uno de los Polos, lo hacemos a un lugar donde el círculo que se recorre (por rotación de la Tierra) es cada vez más pequeño. Y como siempre completamos el círculo en el mismo período de veinticuatro horas, nuestra velocidad en el espacio debe ser cada vez menor. En el polo, claro está, la velocidad es cero.

Una variación semejante de velocidad depende de la distancia a que se esté del centro de la Tierra. Si se está en la cima de una alta montaña, la trayectoria circular que se recorre en veinticuatro horas es más larga que si se está en la base de la montaña. Conforme se desciende de la montaña, la velocidad de revolución va disminuyendo, y sigue descendiendo si se baja al pozo de una mina. Cuanto mayor es la profundidad, tanto más lentamente se gira. En el centro de la Tierra la velocidad sería cero.

EJE DE ROTACION

No es difícil ver cómo estas variaciones en la velocidad producen desviaciones de mano contraria en los dos hemisferios. Naturalmente, la desviación sólo es importante cuando los objetos recorren grandes distancias a gran velocidad. Cuando se tira al blanco con un fusil, la desviación Coriolis de la bala es demasiado pequeña para tomarla en cuenta, pero cuando unos proyectiles intercontinentales se dirigen al norte o al sur, la desviación ya es importante, y debe ser tenida en cuenta si el disparo ha de ser preciso. Imagínese que uno de esos proyectiles está atravesando el hemisferio Norte en dirección al Polo Norte. Cuanto más avance hacia el norte, tanto más pequeños serán los círculos que describirá la Tierra al girar. A causa de la inercia del proyectil, éste *tiende a mantener la velocidad original con la que estuvo moviéndose, con la Tierra hacia el este, en el momento del disparo.* Después de haber recorrido, por ejemplo, 1.000 km hacia el norte, se encuentra en una región donde los objetos son llevados hacia el este por la Tierra a una velocidad mucho menor. Pero el proyectil conserva su primitiva velocidad hacia el este. Por consiguiente deriva hacia el este, o hacia la derecha, cuando corre hacia el polo. Una pequeña reflexión mostrará que si el proyectil está en el hemisferio Sur, marchando hacia el Polo Sur, la deriva es hacia la izquierda. En ambos casos la deriva es hacia el este, pero si usted traza las dos desviaciones sobre un globo terráqueo verá que cada una de ellas es una imagen especular de la otra.

En ambos hemisferios, la desviación Coriolis es hacia el este cuando un objeto se mueve hacia el Polo, y hacia el oeste cuando se mueve hacia el Ecuador. No es extraño que el efecto Coriolis desempeñe un papel importante en los movimientos de las corrientes atmosféricas y oceánicas. Algunos geólogos creen que los ríos que corren hacia el norte en el hemisferio Norte, y hacia el sur en el hemisferio Sur, barren más las orillas del este que las del oeste. No hay duda de que el efecto Coriolis desempeña un papel en el flujo de los ríos, pero los geólogos disienten respecto de si el efecto es lo bastante acusado para que se puedan establecer diferencias en la erosión de las dos orillas. Se han realizado algunos estudios sobre la erosión en las dos orillas del Mississippi y otros ríos que discurren en dirección al norte o al sur, pero los resultados son discutibles.

También está sin decidir la cuestión de si la fuerza Coriolis es lo bastante fuerte para ser observable como una influencia sobre el agua cuando ésta, al desaguar por un sumidero, forma una espiral. Todo el mundo sabe que cuando se desagua una bañera, el agua

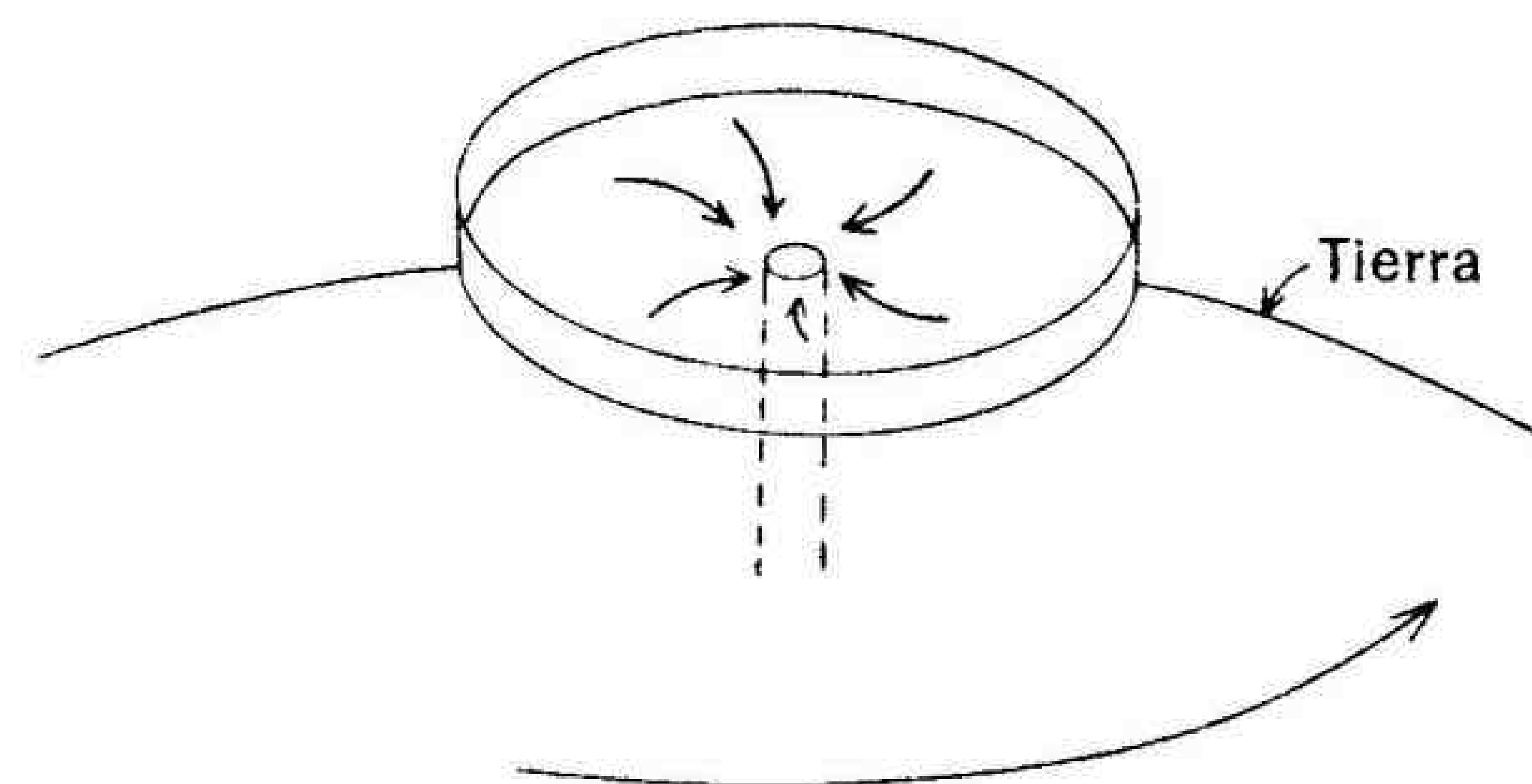


Fig. 18. El agua de un baño formaría, al desaguar, este vórtice en el Polo Norte.

forma un vórtice alrededor del sumidero. Se cree generalmente que el vórtice en un hemisferio tiene una "mano" contraria al vórtice en el otro. Para ver las razones de este hecho, imaginemos una ancha bañera circular, de fondo plano, situada directamente sobre el tope del Polo Norte (fig. 18).

El sumidero, situado en el centro de la bañera, conduce en línea recta a la Tierra. Cuando el agua de la bañera corre hacia el agujero, la fuerza Coriolis la desvía al este en la dirección señalada por las flechas, formando un vórtice en dirección contraria a las agujas del reloj. Una vez que comienza a formarse el remolino, se refuerza a sí mismo y aumenta cada vez más. Es de suponer que el agua de esa bañera, en el Polo Norte, tendería a correr en espiral hacia el sumidero en sentido contrario a las agujas de un reloj, como se ha indicado.

En el Polo Sur la situación se invierte. Es verdad que el agua sigue desviándose al este, pero esta desviación ahora produce un remolino en la dirección de las agujas del reloj. La tendencia del agua a la espiral al escurrirse por un sumidero sería más fuerte en los polos, decreciendo a medida que la bañera se mueve hacia el Ecuador, donde la tendencia desaparecería. En las bañeras australes el agua tendería a ir en sentido contrario. En el Ecuador el agua de la bañera se comportaría como el asno del proverbio entre dos montones de heno: no sabría a qué lado dirigirse.

No hay duda de que si una bañera no situada en el Ecuador fuera lo bastante ancha, y si el agua estuviera absolutamente inmóvil antes de comenzar a desaguar, la rotación de la Tierra *influiría* en la dirección del vórtice. Pero las bañeras son pequeñas y entran

otros factores en la cuestión. El factor más fuerte es la circulación que adquiere el agua cuando se llena la bañera. El agua tiene una "memoria" asombrosa; el movimiento circulatorio persistirá durante horas, mucho después de que el agua aparezca tranquila por completo. Invariablemente, en virtud de esta circulación, el agua comienza a desaguar formando el remolino en la misma dirección. Incluso si se deja reposar el agua varios días antes de evacuarla, la dirección del vórtice puede estar influida por ligeras irregularidades en la superficie de la bañera, los lados del sumidero, etc.

Sin embargo, algunos ensayos parecen mostrar que el efecto de Coriolis en el desagüe de las bañeras *puede* ser detectado. A. H. Shapiro, un físico del Instituto de Tecnología de Mississippi, hizo recientemente algunos experimentos con una bañera circular, de casi dos metros de diámetro. Después de dejar reposar el agua varios días, encontró, al quitar el tapón, un persistente remolino en sentido contrario a las agujas de reloj, lo que atribuyó al efecto Coriolis. Merwin Sibulkin, de la "General Dynamics", en una "Nota sobre el vórtice de la bañera" *(Journal of Fluid Mechanics,* septiembre de 1962, págs. 21-24) no pudo confirmarlo, posiblemente debido a que empleó una bañera demasiado pequeña. Con una bañera circular, de 30 cm de diámetro y lados transparentes, de modo que se pudiera observar el movimiento de un colorante en el agua, Sibulkin confirmó que el vórtice seguía siempre la circulación adquirida por el agua al llenarse la bañera, a menos que se dejara reposar el agua durante unas horas. No se pudo observar ninguna rotación sistemática, de sentido contrario a las agujas del reloj, al desaguar agua completamente quieta. Pero Sibulkin descubrió, con gran sorpresa, que, cualquiera que sea la dirección del vórtice, cuando el agua ha descendido a un centímetro, aproximadamente, de profundidad, la dirección del vórtice ¡se invierte misteriosamente! Lo ha explicado sugiriendo que el agua circulante, cuando se desagua, induce una circulación contraria en una capa de agua en el fondo de la bañera.

Los resultados de Shapiro se vieron respaldados en 1965 por cinco investigadores de la Universidad de Sydney (véase *Scientific American,* noviembre de 1965, pág. 54). Tras dejar reposar el agua durante al menos 18 horas en una bañera circular que desaguaba por su centro, obtuvieron vórtices dextrógiros. "No se puede demostrar", escribieron en *Nature*, "que la causa de los resultados observados no fuera una diminuta y persistente corriente de aire, y que no fue una corriente de aire cuantitativamente comparable, pero en dirección contraria, la que produjo los resultados de Shapiro. No obstante, hemos cobrado confianza en la hipótesis de que los experimentos de desagüe de líquidos en un depósito, cuidadosamente realizados, darán lugar a vórtices en la dirección de las agujas del reloj (dextrógiros), si se efectúan en el hemisferio austral".

Nadie duda de que el efecto Coriolis sea responsable de la tendencia de ciclones y tornados a girar en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio Norte y en sentido horario en el Sur. En cuanto a los vórtices de las bañeras, la cuestión está todavía en discusión, y se requieren bañeras mayores y mejor controladas antes de dar un veredicto final.

7. Plantas y animales

Parece razonable suponer que, entre los miles de millones de galaxias conocidas, cada una con miles de millones de estrellas, debe de haber planetas circulando en torno a muchas de estas estrellas, y que en algunos de estos planetas debe haber vida: «¡Qué triste espectáculo!», exclamó Tomás Carlyle cuando consideraba la posibilidad de que el Universo contuviera planetas por millones. «Si están habitados, ¡qué campo para el dolor y la insensatez!; si no lo están, ¡qué despilfarro de espacio!»

Por el momento nadie sabe realmente si la vida está en alguna forma diseminada por el Universo, encerrada en nuestra propia galaxia o en nuestro sistema solar. No conocemos siquiera si hay vida en Venus o Marte, los dos planetas más cercanos a la Tierra. Sin embargo, se aproxima rápidamente el tiempo en que algunas de estas preguntas podrán ser contestadas.

Suponiendo que se hayan desarrollado formas de vida en otros planetas, estas formas ¿no serán completamente distintas de todo cuanto hayan imaginado incluso los escritores de ciencia-ficción? ¿O poseerán ciertos rasgos en común con la vida tal como la conocemos? Todo esto, naturalmente, son puras especulaciones, pero con respecto a las cuestiones de simetría podemos hacer algunas conjeturas verosímiles. En la Tierra, la vida comenzó con simetría esférica, y después se ramificó en dos direcciones principales: el mundo de las plantas, con simetría semejante a la de un cono, y el mundo animal, con simetría bilateral. Hay buenas razones para pensar que la evolución en cualquier planeta, si es que se produce tenderá a seguir una pauta similar.

La primitiva vida unicelular, flotando en un mar y dando vueltas constantemente, asumiría naturalmente una forma esférica, con

planos de simetría en todas direcciones. Pero una vez que una forma viviente se fija al fondo de un mar o a la tierra, se crea un eje arriba-abajo permanente. El extremo arraigado de una planta se distingue, evidentemente, del extremo superior. Pero en el mar o en el aire nada permite distinguir entre los extremos de un eje delante-detrás o derecha-izquierda. Por esta razón, las formas de las plantas, en su mayor parte, tienen una simetría similar, en términos generales, a la de un cono: ningún plano horizontal de simetría, sino una infinidad de planos verticales. Un árbol, por ejemplo, tiene desde luego una copa y un pie, pero es difícil diferenciar la parte delantera de la espalda de un árbol, o la derecha de la izquierda. La mayoría de los capullos de las flores tienen, a grandes rasgos, un tipo cónico de simetría. Los frutos tienen a veces simetría esférica (si no se tiene en cuenta el punto por donde se sujetan a una rama): naranjas, sandías, cocos, etc. Una simetría de tipo cilíndrico (una infinidad de planos que pasan a través de un eje, y un plano perpendicular a este eje que lo divide en dos partes iguales) existe en frutos como las uvas y melones. Frutos familiares con simetría cónica son la manzana y la pera. (Los biólogos emplean el término "simetría radial" para la simetría de los dos tipos, cilíndrico y cónico.) La banana proporciona un ejemplo de simetría bilateral. Debido a su curvatura y a su extremo puntiagudo, sólo se puede cortar la banana en dos mitades, imagen especular una de otra, por un plano de simetría.

¿Hay ejemplos de asimetría (ausencia total de planos de simetría) en el mundo de las plantas? Sí, y los ejemplos más notables son las plantas que presentan forma de hélice en alguna parte de su estructura. Como hemos visto en un capítulo anterior, la hélice no puede ser superpuesta a su imagen especular. Por tanto, tiene dos formas distintas: la hélice dextrógira, que corresponde a un tornillo que gira en el sentido de las agujas del reloj cuando penetra en la madera, y la hélice levógira, que es la imagen especular de la hélice dextrógira. Las hélices abundan en el mundo vegetal, no sólo en los tallos, troncos y zarcillos, sino también en la estructura de miles de semillas, flores, piñas y hojas, así como en la disposición helicoidal de las hojas alrededor de un tallo.

Es en las plantas que trepan y se enroscan donde la hélice puede verse en su forma más regular. La mayoría de las plantas trepadoras, cuando se enroscan alrededor de estacas, árboles u otras plantas, lo hacen formando hélices hacia la derecha, pero hay miles de variedades que se enroscan en dirección contraria. Algunas espe-

cies tienen variedades de ambas formas, a la izquierda y a la derecha, pero por lo general una especie no modifica nunca su propia dirección. La madreselva, por ejemplo, se enrosca siempre formando una hélice hacia la izquierda. La familia de las enredaderas (de la que el dondiego de día es una especie muy conocida) siempre se enrosca en hélices hacia la derecha. Cuando dos plantas de la misma dirección se entrelazan, el resultado es una producción bien ordenada de hélices entretejidas, todas del mismo tipo; cuando se entrelazan plantas que se enroscan en distintas direcciones, producen una maraña inextricable. El confuso abrazo derecha-izquierda de la enredadera y la madreselva, por ejemplo, fascinó durante mucho tiempo a los poetas ingleses. «La azul enredadera», escribió Ben Jonson en 1617, en su *Vision of Delight*, «se abraza a la madreselva». En el acto 4, escena 1, del *Sueño de una noche de verano* de Shakespeare, la Reina Titania describe su prometido abrazo a Bottom el Tejedor (cuya cabeza ha sido transformada por Puck en la cabeza de un asno), diciendo: «Duerme y yo te rodearé con mis brazos... Así enlaza la enredadera gentilmente a la madreselva».

Más recientemente, Michael Flanders, un poeta y actor zurdo de Londres, escribió un gracioso poema sobre el amor de la correhuela por la madreselva, al que puso música su amigo Donald Swann. En una visita al Museo de Historia Natural de Kensington, Flanders quedó impresionado por una exhibición de los hábitos de las plantas trepadoras de enroscarse hacia la derecha y hacia la izquierda. El resultado fue su poema *Misalliance*. (Se le puede oír, cantado por Flanders y Swann, en el disco Angel de su revista *At the Drop of a Hat*.) Con permiso de Flanders, transcribo íntegra la letra de la canción:

CASORIO

La fragante madreselva asciende al sol en espirales hacia la derecha* –igual que otras muchas trepadoras. –Pero algunas trepan retorciéndose hacia la izquierda –la correhuela**, por ejemplo; –es decir, el *Convolvulus*, que así se llama–. Arraigadas a uno y otro lado de una puerta, cada especie creció –cada una retorciéndose a su modo hasta el dintel. –Allí se detuvieron, entrecruzaron sus zarcillos, sonrieron y se enamoraron. –Dijo la diestra madreselva a la zurda corregüela: –«Casémonos –si nuestros padres no se oponen; nos amaríamos sin separarnos jamás –e inextricablemente entrelazados –viviríamos siempre felices». –dijo la madreselva a la correhuela.

–Los padres de la madreselva se escandalizaron. –«Las correhuelas –exclamaron– son de raza inferior. –No son cultivadas ni de buena crianza. –Nosotras nos enroscamos a la derecha, y ellas a la izquierda». –Dijo la correhuela, que se torcía a la izquierda, a la madreselva, que se torcía a la derecha: –«Debemos empezar a ahorrar –muchos pocos hacen un mucho*** –y luego nos iremos de luna de miel –con la esperanza de que mejore nuestra suerte», –dijo la correhuela a la madreselva. –Una abeja que pasaba les advirtió: –«Lo he dicho antes y lo volveré a decir. –Pensad en vuestros vástagos si los vais a tener. –Jamás recibirán mi bendición. –¡Pobrecitas criaturas! ¿Cómo podrán saber –hacia dónde inclinarse al trepar? –derecha-izquierda, ¡qué desgracia! –O puede que suban rectas y ¡se caigan de bruces!» –Los diestros zarcillos de la madreselva –dijeron a los zarcillos zurdos de la correhuela: –«Parece que todos los hados se han unido contra nosotros.

–¡Oh, querida! ¡Oh, mi querida Colombina! –Te he perdido para siempre, –ya no podremos entrelazarnos nunca.» –Juntas las encontraron a la mañana siguiente. –Se habían arrancado las raíces y marchitado hasta morir –privadas de la libertad por la que debemos luchar, –¡girar a la izquierda o girar a la derecha!

Además de enroscarse alrededor de las cosas formando una hélice en una dirección determinada, las plantas trepadoras tienen también tallos que se tuercen del mismo modo que se enroscan. Algunas veces dos o más tallos de la misma planta se enroscan juntos a modo de una cuerda. La bignonia, por ejemplo, tiende a formar hebras triples que se retuercen hacia la izquierda. A veces los troncos de las hayas, castaños y otros árboles muestran una violenta torsión de la corteza en forma helicoidal, aunque la torsión puede ser indistintamente a la derecha o a la izquierda sin relación con las especies.

Los animales sésiles (animales adheridos a algo e incapaces de moverse por sí mismos), como las anémonas de mar, suelen tener

*En este libro he adoptado la convención de llamar una hélice de la mano derecha si corresponde al paso helicoidal de un tornillo corriente. Flanders adopta la convención contraria de llamar a esa hélice de la mano izquierda a causa de que, cuando usted la mira desde cualquier extremo, la ve trazando una espiral hacia usted en una dirección contraria a las agujas del reloj. Esta confusión de terminología corre a través de toda la literatura sobre las plantas trepadoras.

**En la época de Shakespeare la "bindweed" (correhuela) era llamada a veces la "woodbine". Más tarde esta última palabra fue usada exclusivamente como otro término para "honeysuckle" (madreselva), un hecho que ha confundido a docenas de comentadores de Shakespeare, fáciles de confundir. Algunos han reducido el pasaje a una tontería al suponer que la bella reina Titania "algún tiempo de la noche" estaba hablando de sí misma y Bottom como entrelazados a la manera de la madreselva con la madreselva. Conociendo la opuesta "mano" de la correhuela y la madreselva se realza, desde luego, la significación de la apasionada metáfora de Titania.

***Expresión escocesa.

un tipo cónico de simetría radial, similar al de muchas plantas. Animales que se mueven lenta y débilmente, como los equinodermos (estrellas de mar, holoturias y otras especies) y la medusa, también tienen simetría cónica. Estos animales flotan en el mar o yacen en el fondo donde el alimento y el peligro se aproximan con la misma probabilidad por todos lados. Sin embargo, tan pronto como una especie desarrolló una fuerte capacidad de locomoción, era inevitable que se desarrollaran características que distinguieran la parte frontal del animal de su espalda. En el mar, por ejemplo, la capacidad de moverse rápidamente en busca de alimento proporciona a un animal una ventaja competitiva con las formas sésiles o de movimientos lentos. Evidentemente, una boca es más eficaz en el extremo frontal de un pez que en su extremo trasero; pues el pez puede nadar directamente hacia el alimento y engullirlo antes de que otro animal lo alcance. Este simple rasgo solo, la boca, es suficiente para diferenciar la parte frontal de la espalda (como dicen los biólogos, la parte *cefálica* de la *caudal*) de un pez. Otros rasgos, como los ojos, son también sin duda más eficaces en la parte frontal, cerca de la boca, que en la espalda. Un pez quiere ver hacia donde va, no donde ha estado. En resumen, el simple hecho de nadar en el agua produjo una situación en la que era inevitable que las fuerzas de evolución trazaran rasgos que distinguieran un extremo de un animal marino del otro.

Al mismo tiempo que la locomoción llevó a distinciones entre frente y espalda, la fuerza de gravedad produjo diferencias similares entre la parte superior y la inferior de un animal o, para usar otra vez términos de los biólogos, la parte *dorsal* y la parte *ventral*. (Cuando un animal, como el hombre, anda erecto, entonces, naturalmente, sus partes ventral y dorsal corresponden a frente y espalda, y sus extremos cefálico y caudal se convierten en el superior y el inferior; pero en este capítulo nos limitaremos a la vida en el mar.) ¿Y qué pasa con la derecha y la izquierda? Basta un momento de reflexión para darse cuenta de que en el medio ambiente acuoso del mar no hay nada que permita establecer diferencias entre derecha e izquierda. Cuando nada, un pez encuentra una acusada diferencia entre ir hacia delante o hacia atrás, porque una es la dirección en que va, la otra es la dirección de donde viene. También encuentra una gran diferencia entre ir hacia arriba o hacia abajo. Si nada hacia arriba alcanza la superficie del mar, y si nada hacia abajo toca el lecho del océano. Pero ¿qué diferencia encuentra si gira a la derecha o a la izquierda? Ninguna. Si gira a la izquierda encuentra el mar y

las cosas que hay en él, exactamente lo mismo que si gira a la derecha. No hay fuerzas, como la fuerza de la gravedad, que actúen horizontalmente en una sola dirección. Por esta razón, varios rasgos –aletas, ojos, etc.– tienden a desarrollarse por igual a los lados derecho e izquierdo. Si para un pez, al nadar, fuera una gran ventaja ver únicamente a la derecha y no a la izquierda, sin duda el pez habría desarrollado un solo ojo a la derecha. Pero no existe tal ventaja. Es fácil comprender por qué existe un solo plano de simetría que divide al pez bilateralmente en dos lados, derecho e izquierdo, que son imágenes especulares uno de otro.

Cuando los reptiles se arrastraron por la tierra y evolucionaron convirtiéndose en pájaros y mamíferos, no había nada de su nuevo entorno que exigiera un cambio en simetría bilateral. El eje de arriba y abajo ejercía una influencia aún más fuerte sobre la estructura de un animal, a causa de que necesitaban apéndices para la locomoción por el suelo. ¡Los pies son de poco valor adheridos al dorso de un animal y agitándose en el aire! Naturalmente, la diferencia entre frente y espalda seguía siendo importante[1]. En cuanto a la derecha y la izquierda, la situación en la tierra o en el aire seguía siendo tan simétrica como en el mar. Un animal en la selva o un pájaro en el cielo encuentra su entorno a la izquierda muy parecido a su entorno a la derecha. Es fácil comprender por qué los cuerpos de los animales de tierra y aire conservan la simetría bilateral que adquirieron anteriormente en el mar. H. S. M. Coxeter en su precioso libro *Introduction to Geometry* (Wiley, 1961) nos recuerda que fue esta simetría bilateral la que William Blake describe en estos conocidos versos:

Tigre, tigre que resplandeces
en las sombras nocturnas,
¿qué ojo o mano inmortal
se atreverá a abarcar tu temible simetría?

En vista de la simetría general de la Tierra y de las fuerzas que actúan sobre ella, es difícil concebir circunstancias en el futuro que puedan alterar este tipo fundamental de simetría en los cuerpos de los animales. La más ligera pérdida de simetría bilateral, como por ejemplo, la pérdida del ojo derecho, tendría un valor negativo inmediato para la supervivencia del animal. Un enemigo podría acercarse solapadamente por el lado derecho sin ser observado.

Estamos ahora en situación de comprender por qué, si en otros

planetas hay animales capaces de moverse por sus mares, por su atmósfera y por su suelo, es probable que tengan también simetría bilateral. En otro planeta, igual que en la Tierra, los mismos factores actuarían para producir esa simetría. La gravedad establecería una diferencia fundamental entre arriba y abajo y la locomoción originaría una diferencia fundamental entre frente y espalda. La falta de alguna asimetría fundamental en el entorno permitiría que la simetría derecha-izquierda de los cuerpos quedase sin modificar.

¿Podemos ir más allá en esta materia? ¿Podemos esperar semejanzas más detalladas entre la vida extraterrestre y la vida que conocemos? Sí, podemos. En los extraños mares de otro planeta, independientemente de su composición química, es difícil imaginar una forma de locomoción más simple, desarrollada a través de la evolución, que el movimiento conseguido mediante colas y aletas ondulantes. Que la evolución daría lugar a este tipo de propulsión está apoyado por el hecho de que incluso en la Tierra se ha desarrollado independientemente. Los peces desarrollaron una propulsión por aletas y cola. Después los peces evolucionaron hacia la forma de anfibios, que se arrastraron por el suelo y se convirtieron en reptiles. Los reptiles dieron lugar, por evolución, a los mamíferos. Pero cuando algunos mamíferos volvieron al agua –aquéllos que con el tiempo se convirtieron, por ejemplo, en ballenas y focas– sus patas involucionaron haciéndose aletas, y su cola se convirtió en un instrumento en forma de aleta para propulsar y timonear.

De modo semejante, es difícil imaginar una manera de volar por el aire más sencilla que por medio de alas. Incluso en la Tierra, se ha producido un desarrollo independiente y paralelo de las alas. Los reptiles desarrollaron alas y pasaron a ser animales voladores, y lo mismo sucedió con los insectos. Algunos mamíferos, como la ardilla voladora, desarrollaron alas para planear. Otro mamífero, el murciélago, desarrolló unas magníficas alas. Una especie de peces, que saltan del agua para librarse de la captura, ha desarrollado unas rudimentarias alas planeadoras. Incluso el hombre, cuando construye un aeroplano, lo hace con alas, de forma que recuerda a un pájaro volando.

¿Puede haber un método más sencillo para que un animal pueda moverse sobre el suelo que no sea por medio de apéndices articulados? Las patas de un perro no son muy diferentes, en su funcionamiento mecánico, de las patas de una mosca doméstica, aunque hayan tenido una evolución por completo independiente. Desde luego, una rueda también es una máquina sencilla para desplazarse en el suelo, pero hay buenas razones por las que es difícil que una rueda evolucione. En primer lugar, necesita ser sostenida por un eje; la rueda tiene que estar separada del eje y libre para girar en él, o bien el eje mismo debe girar y, por tanto, estar separada del cuerpo. Después está el gran problema de encontrar la manera de que el cuerpo haga girar una rueda. Las dificultades son grandes, pero supongo que no insuperables. L. Frank Baum, en *Ozma of Oz,* inventó una raza de hombres llamados los Rodadores, con cuatro patas, como los perros, terminadas cada una en una pequeña rueda en vez de un pie. En *The Scarecrow of Oz* (El espantapájaros de Oz) inventó el Ork, un pájaro con una hélice en el extremo de la cola. Si en algún planeta la naturaleza encuentra la manera de inventar la rueda, podremos hallar allí animales parecidos a bicicletas y coches, peces parecidos a lanchas motoras y pájaros semejantes a aviones, aunque las perspectivas parecen muy improbables[2].

Los órganos sensoriales, como ojos, oídos y narices, tienen cierto género de inevitabilidad en el caso de que la vida desarrolle algún tipo de actividad inteligente avanzada. Las ondas electromagnéticas son ideales para dar a un cerebro un "mapa" preciso del mundo exterior. Las ondas de choque transmitidas por las moléculas suministran claves adicionales valiosas del entorno, y son captadas por los oídos. La dispersión de moléculas de una sustancia es detectada por las narices[3]. Como la luz, los sonidos y las moléculas existen de cierto en otros planetas, parece probable que la evolución invente sentidos para aprovechar estos fenómenos como medios para conseguir un mayor control sobre las circunstancias de la vida. Aquí en la Tierra, por ejemplo, los ojos han seguido al menos tres desarrollos paralelos, independientes entre sí: los ojos de los animales vertebrados, los de los insectos y los de varios moluscos. El pulpo, por ejemplo, tiene un ojo magnífico, de hecho superior al nuestro en algunos aspectos. Tiene párpados, córnea, iris, lente y retina –como el ojo humano–; sin embargo, evolucionó con completa independencia de la evolución del ojo de los vertebrados. Es difícil encontrar un ejemplo más asombroso de cómo la evolución, a través de dos líneas separadas de desarrollo, se las ha ingeniado para inventar dos complicados instrumentos que tienen esencialmente la misma función y estructura.

Hay buenas razones para que los ojos y otros órganos sensoriales formen una especie de rostro. En primer lugar, es una ventaja tener los ojos, oídos y nariz cerca de la boca, donde son útiles en la búsqueda del alimento. También hay una gran ventaja en tenerlos

cerca del cerebro. Se necesita tiempo para que un impulso nervioso pase de los órganos al cerebro; cuanto más deprisa se transmita, más rápidamente reaccionará el animal para capturar el alimento o evitar el peligro. Incluso el cerebro mismo, que necesita valorar e interpretar los datos sensoriales, realiza su pensar mediante redes eléctricas, una especie de minicomputador eléctrico de gran complejidad. Los filamentos nerviosos que conducen cargas eléctricas es posible que sean esenciales en los cerebros de las formas vivientes superiores.

Si la vida en otro planeta alcanza el nivel de inteligencia del hombre en la Tierra, parece probable que tenga al menos algunos rasgos "humanoides". Hay evidentes ventajas en tener dedos al extremo de los brazos. Para su protección, el valioso cerebro necesitaría estar fuertemente encerrado y tan lejos del suelo como fuera posible, donde estaría mejor protegido de los golpes al moverse. Los órganos sensoriales, cercanos al cerebro y en la parte frontal, crearían algo parecido a un rostro. El "senador" Clarke Crandall, un humorista de Chicago, hace divertidos chistes sobre las ventajas de tener los órganos de los sentidos en otros lugares del cuerpo. Un ojo en la yema de un dedo, por ejemplo, permitiría ver un desfile levantando la mano y mirando por encima de las cabezas de todo el mundo. Las orejas debajo de los sobacos estarían calientes en tiempo frío. Una boca en lo alto de la cabeza permitiría a un individuo poner un emparedado debajo de su sombrero y comerlo en el camino al trabajo. Es fácil ver por qué la evolución ha evitado tales situaciones. Un ojo en un dedo sería demasiado vulnerable y estaría demasiado lejos del cerebro. Los oídos en los sobacos no serían eficaces para oír, a menos que los brazos se mantuvieran siempre levantados. Una boca en la cabeza expondría al cerebro a algún daño, y haría difícil ver lo que se está comiendo; y así todo lo demás.

Naturalmente, están implicados tantos factores fortuitos, y los medios ambientes de los planetas son tan variados, que no hay que esperar encontrar en otros planetas formas de vida que sean réplica exacta de algunas especies de la Tierra. Nadie espera encontrar elefantes o jirafas en Marte. Por otra parte, la vida extraterrestre no puede ser tan extraordinariamente diferente de las formas terrestres como estamos tentados de pensar. Los BEMs de la ciencia-ficción (BEM es un acrónimo formado por las iniciales de Bug-Eyed Monster, el monstruo de los ojos de chinche), distintos de cualquier animal terrestre, pero sin embargo reconocibles como animales, puede resultar que no estén lejos de la realidad a fin de cuentas. Es difícil,

en efecto, imaginar cómo las criaturas extraterrestres pueden diferir de las terrestres en mayor grado que las criaturas terrestres difieren unas de otras. Si nunca hubiéramos visto u oído hablar de algunos animales, como el pulpo, el ornitorrinco, el cálao, el avestruz o la serpiente, su estructura nos parecería tan extraña e inverosímil como la de cualquier animal que pudiéramos encontrar en Marte. Tenemos un buen ejemplo de BEM en miniatura en la anableps, una pequeña carpa azulada de Centroamérica que tiene cuatro ojos. Bueno, no realmente. Los enormes ojos, como ampollas monstruosas, están divididos en dos mitades, superior e inferior, por una banda opaca. Cada ojo tiene una sola lente, pero hay córneas e iris superior e inferior. El pequeño pez (tiene unos 20 cm de longitud) nada con la banda opaca exactamente al nivel del agua, de modo que los dos "ojos" superiores pueden ver sobre el agua mientras los dos "ojos" inferiores ven por debajo del agua. En el siguiente capítulo veremos algo sobre la vida sexual asimétrica de este curioso animal.

Animales tan fantásticos como los anableps, sin duda mucho más fantásticos, probablemente vagan por los mares, la tierra y los cielos de los planetas lejanos, pero quizá no sean tan sobrenaturales que no los reconozcamos como animales. La base principal para este reconocimiento, más fundamental que cualquier otro aspecto de sus formas, ha de ser, probablemente, la simetría bilateral de sus cuerpos.

8. Asimetría en los animales

Lo mismo que la asimetría izquierda-derecha se presenta aquí y allá en el mundo radialmente simétrico de las plantas, también se da en el mundo bilateralmente simétrico de los animales. Sólo tenemos espacio para tratar algunos de los ejemplos más interesantes.

Como en el mundo vegetal, la asimetría se introduce automáticamente en cuanto una simple hélice forma parte de la estructura de un animal. Desde luego, cuando una hélice en un lado del cuerpo de un animal es compensada con una hélice de "mano" contraria en el otro lado, se conserva la simetría bilateral. Esto se aplica a los pares de colmillos que tienen torsiones helicoidales (p. ej., los colmillos de los extintos mamuts), y a la larga y magnífica cornamenta de carneros, cabras, antílopes y otros animales. Muchos grandes huesos en el pecho, las patas y otras partes del cuerpo de los animales (incluido el hombre) tienen torsiones helicoidales, pero los del lado izquierdo tienen su contrapartida especular en el derecho. Las antenas de los insectos se enrollan a veces formando pares de hélices enantiomorfas. Las alas de los pájaros, murciélagos e insectos tienen también ligeras torsiones helicoidales de "mano" contraria en lados opuestos del cuerpo.

Cuando existe una sola hélice en la estructura de un animal, entonces evidentemente hay asimetría. Muchos tipos de bacterias y los espermatozoos de todos los animales superiores tienen esas estructuras helicoidales, pero los ejemplos más notables son las conchas de los caracoles y otros moluscos. No todas las conchas espirales son asimétricas. La concha del nautilo, por ejemplo, se enrosca sobre un plano y, por tanto, puede ser dividida en dos partes iguales, como una nebulosa espiral, por un plano de simetría. Pero hay miles de bellas conchas de moluscos, como las que se ven en la figu-

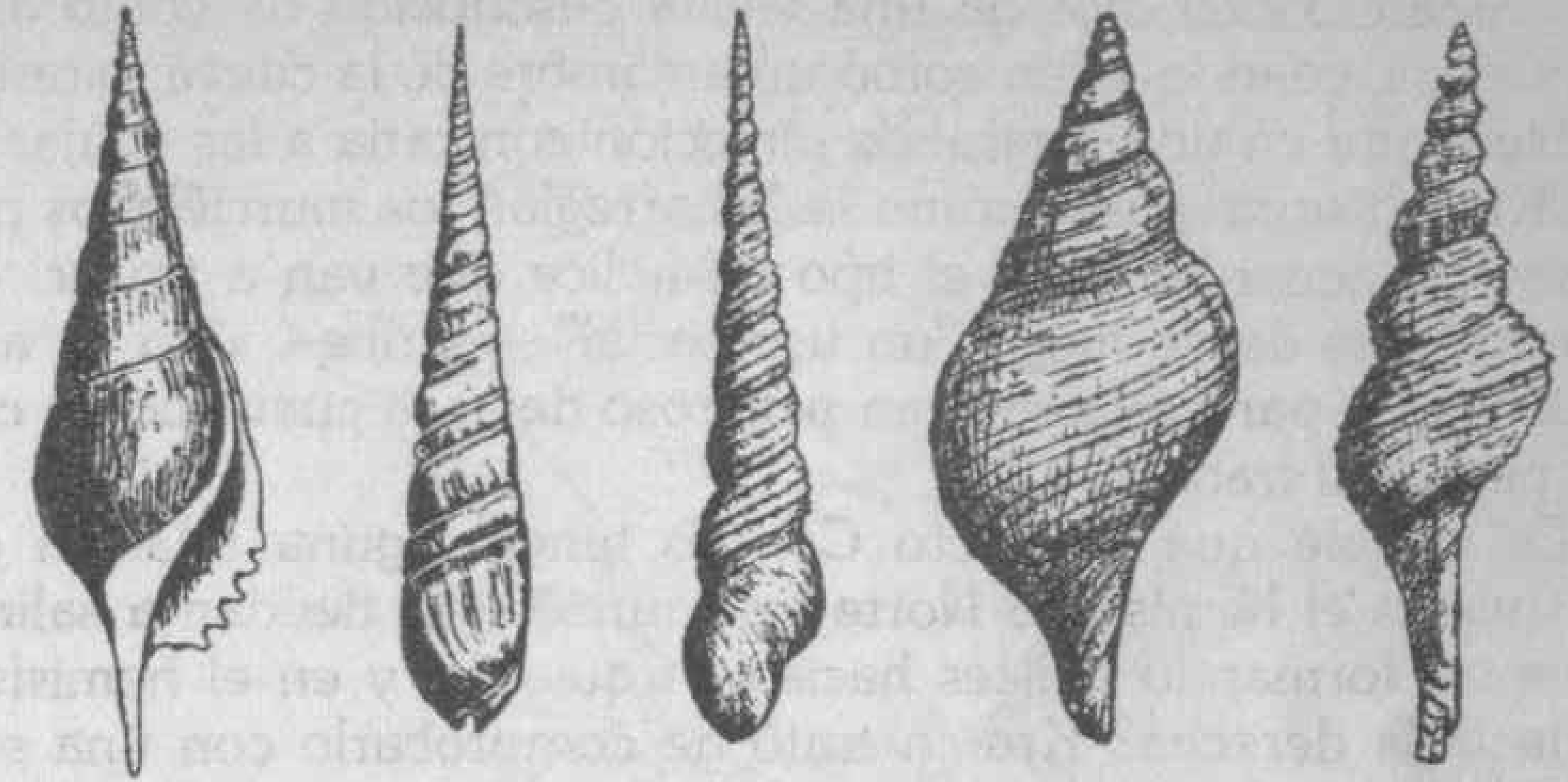


Fig. 19. Conchas de moluscos dextras, arrolladas hacia la derecha.

ra 19, que son hélices cónicas, dextrógiras o levógiras. Como en el caso de las plantas trepadoras, la mayoría de las conchas de este tipo se enroscan hacia la derecha, aunque también son corrientes las que lo hacen hacia la izquierda. Algunas especies van siempre hacia la derecha, y otras siempre hacia la izquierda. Unas van hacia la derecha en una localidad y hacia la izquierda en otra. Todas las especies tienen ocasionales variedades que van en dirección equivocada; son raras y muy apreciadas por los coleccionistas de conchas. Miles de diferentes especies de conchas fósiles, con hélices a la derecha o a la izquierda, han sido clasificadas por los paleontólogos.

En algunas zonas de Nebraska y Wyoming se encuentra en gran abundancia un extraño tipo de fósil helicoidal, conocido como el "sacacorchos del demonio". Estas grandes espirales de cuarzo, de seis o más pies de altura, van unas veces hacia la derecha y otras hacia la izquierda. Durante decenios, los geólogos discutieron entre sí sobre lo que eran: la principal discrepancia era entre los que pensaban que se trataba de fósiles de plantas trepadoras extinguidas hace mucho tiempo, y los que creían que eran formas de antiguas madrigueras helicoidales hechas por los antecesores de los modernos castores. La teoría de los castores triunfó definitivamente cuando en ellas se encontraron restos de pequeños castores. Fósiles espirales semejantes, de origen similar, se encuentran en distintas partes de Europa.

Un ejemplo notable de vuelo helicoidal la dan los cientos de miles de murciélagos que duermen en las cavernas calizas de Carls-

bad, Nuevo Méjico. Joseph Wood Krutch, en su libro *The Desert Year* (Sloan, 1952), nos da una vívida descripción de cómo estos murciélagos, cuando salen como un enjambre de la cueva, giran invariablemente en una espiral de dirección contraria a las agujas del reloj. Krutch se pregunta cómo se las arreglan los murciélagos para ponerse de acuerdo sobre el tipo de hélice que van a trazar. «Su convención es desde luego "un uso social" –escribe–. «Sin él, a un murciélago le parecería casi tan peligroso dejar la cueva como conducir para ir al trabajo.»

¿Es posible que el efecto Coriolis tenga alguna relación con esto, que en el hemisferio Norte los murciélagos tiendan a salir de las cuevas formando hélices hacia la izquierda, y en el hemisferio Sur hacia la derecha? Krutch trató de comprobarlo con una serie de autoridades en materia de murciélagos, pero no pudo encontrar información suficiente sobre la cuestión. Un efecto Coriolis parece muy improbable; sin embargo, la dirección de las trayectorias helicoidales trazadas por los murciélagos al salir de las cuevas sigue siendo una materia interesante aún no explorada por los naturalistas. «Acaso algún día alguien coloque en sentido vertical un túnel de pruebas aerodinámicas abandonado –dice Krutch– y ponga unos cientos de murciélagos en el fondo... Los murciélagos se han ido a mi campanario... Ya estoy viendo mi petición a una de las fundaciones. Proyecto propuesto: "Un estudio del efecto Coriolis en relación con el vuelo de los murciélagos."»

Volviendo a las asimetrías animales distintas de la helicoidal, una de las más absurdas es la enorme pinza a la izquierda o a la derecha del cagrejo "violinista" (fig. 20). El cangrejo hace con esta pinza una especie de movimiento de violinista, y de ahí su nombre. Entre los pájaros, un divertido ejemplo de asimetría lo ofrece el piquituerto, un pequeño pájaro rojo de la familia de los pinzones. La parte superior del pico cruza sobre la inferior como las hojas de un par de tijeras y, como las tijeras, pueden cruzarse de cualquiera de las dos maneras de imagen especular. En la especie dominante en Estados Unidos, la parte superior del pico cruza a la izquierda del pájaro; las especies dominantes en Europa tienen un pico que cruza en la otra dirección. El pico lo emplean como un instrumento para abrir las piñas de los árboles, de la misma forma que un abrelatas corriente. Una vez abierta la piña, el pájaro introduce la lengua y extrae la semilla. Una antigua y pintoresca leyenda cuenta que el pájaro se compadeció de Cristo crucificado y con el pico intentó arrancar los clavos de la cruz. Este inútil esfuerzo de piedad

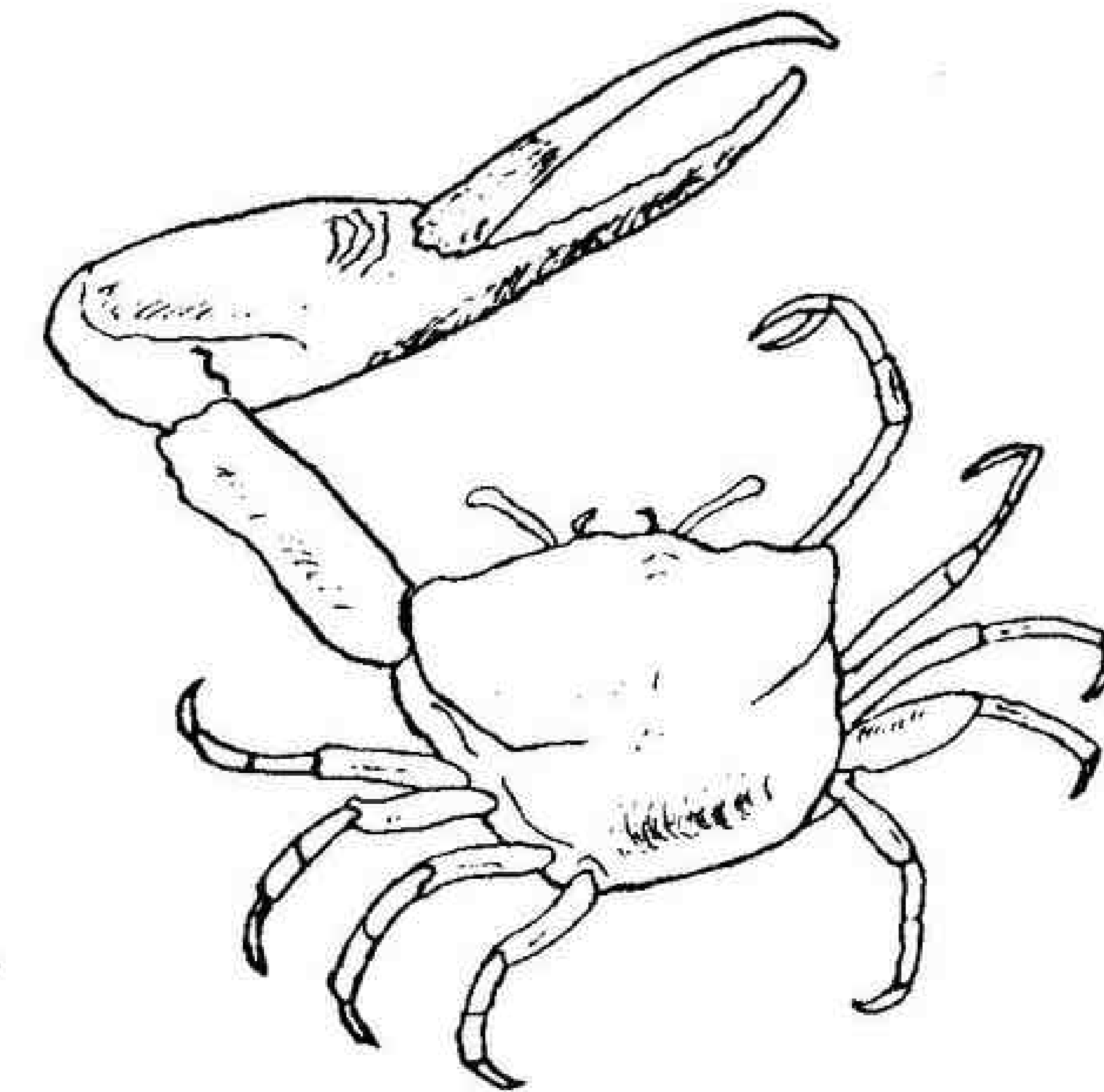


Fig. 20. El cangrejo violinista con pinza a la izquierda.

torció el pico del pájaro y manchó de sangre su plumaje. El único pájaro que tiene todo el pico torcido hacia un lado es el chorlito de pico curvado de Nueva Zelanda. Utiliza el pico para remover las piedras cuando busca alimento, y como el pico está curvado hacia la derecha, el pájaro busca comida principalmente por ese lado.

Los pájaros hembras de todos lo géneros, con pocas excepciones, muestran una curiosa asimetría derecha-izquierda respecto a sus ovarios y oviductos. En las hembras jóvenes, los dos ovarios, derecho e izquierdo, y sus oviductos son del mismo tamaño; cuando el pájaro llega a la edad madura, los órganos de la derecha degeneran y se hacen inútiles. Sólo es funcional el oviducto izquierdo, que se ensancha mucho durante la época de la puesta de los huevos.

En el mundo de los peces, el ejemplo más notable de asimetría lo ofrece la extensa familia de los pleuronéctidos o peces planos, que comprende, entre otras especies, el lenguado y la platija. Las crías de estos peces tienen simetría bilateral, con un ojo en cada lado, y chapotean cerca de la superficie del mar. Pero cuando se van haciendo adultos, uno de los ojos emigra lentamente alrededor de la cabeza, hasta que ambos ojos están en el mismo lado, como en una cara pintada por Picasso. El pobre pez desciende entonces al fondo del mar, donde yace en el barro o en la arena, sobre su lado ciego, con sus dos ojos proyectados hacia arriba. Los ojos giran in-

dependientemente; el pez puede mirar hacia delante con uno y hacia atrás con el otro. El lado ciego inferior del pez es blancuzco, pero el lado superior es de color más fuerte y está moteado, para imitar el fondo del mar. Algunas especies tienen precisamente la facultad de alterar su color para confundirse con el medio en que viven, y de este modo sustraerse mejor a sus enemigos. Hay cientos de especies diferentes de peces planos, la mayoría con los ojos siempre al lado derecho, aunque otros los tienen siempre al lado izquierdo. El halibut o hipogloso, por ejemplo, es un pleuronéctido dextro, con los ojos en el lado derecho; el rodaballo es sinistro, o sea con los ojos al lado izquierdo. Todos los lenguados dextros se encuentran sólo en aguas europeas; todos los sinistros, sólo en aguas tropicales o semitropicales. En todas las especies, nunca falta un "guasón" ocasional cuyos caracteres difieren de los de sus parientes. Hay una interesante discusión acerca del lenguado en el capítulo 7 *El origen de las especies*, de Charles Darwin. (Darwin replicaba acertadamente a un crítico de la evolución que sostenía que no se puede concebir cómo la peculiar migración de los ojos de los lenguados puede ser resultado de la selección natural.)

La anableps, el pequeño pez de cuatro ojos mencionado al final del capítulo precedente, tiene una vida sexual asimétrica, que es absolutamente única entre los vertebrados. Sus crías nacen vivas, lo que significa que el macho tiene que fertilizar los huevos de la hembra dentro del cuerpo de ésta. Pero la hembra tiene sólo una abertura al lado derecho o al izquierdo. En otras palabras: todo pez individual es sexualmente dextro o sinistro, lo que hace imposible que se apareen dos peces dextros o dos sinistros. Afortunadamente, los dos sexos, machos y hembras, son dextros o sinistros en una proporción del 50 por 100; si ambos sexos fueran de la misma "mano", la especie se vería pronto en grave aprieto. Aquí tenemos una divertida analogía, en el mundo animal, con la unión de la correhuela y la madreselva.

Los colmillos de los animales (los colmillos son sencillamente dientes que se han desarrollado para servir a un fin particular), como los del elefante y la morsa, raras veces tienen exactamente el mismo tamaño; de ordinario una especie tiende a ser dextra o sinistra por sus colmillos, en el sentido de que un colmillo es más largo que el otro, y a menudo más usado. En África, el colmillo derecho de los elefantes suele denominarse colmillo "sirviente", debido a que el elefante prefiere usarlo para escarbar.

El narval, una especie de ballena pequeña que vive en los mares del Polo Norte, ofrece el ejemplo más extremo de desarrollo asimétrico de los colmillos. Ambos sexos del narval tienen sólo dos dientes, uno junto a otro, a uno y otro lado del plano de simetría, dentro de la mandíbula superior del animal. En el narval hembra ambos colmillos están permanentemente dentro de la quijada. El diente derecho del macho queda oculto de manera similar durante toda la vida, pero el izquierdo crece hacia delante, formando un colmillo de marfil que es más largo que ila mitad de la longitud de la ballena! Si la ballena tiene una longitud de tres o cuatro metros desde la cola hasta el morro, este ridículo diente tendrá dos o dos metros y medio de largo, y será tan recto como una lanza. Es, en efecto, el diente más largo del mundo. (Véase fig. 21.)

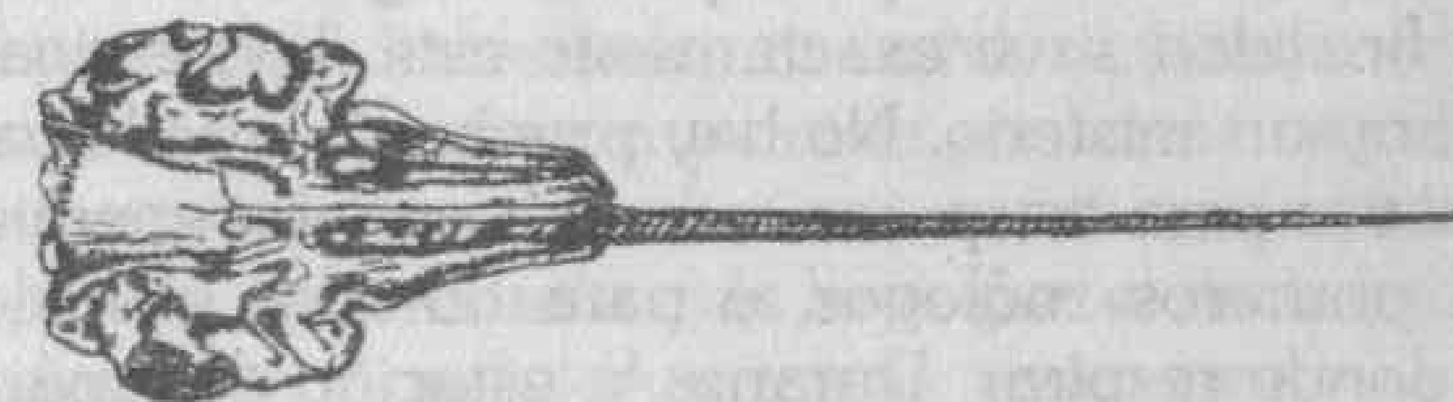


Fig. 21. Cráneo del narval visto desde abajo.

Alrededor del colmillo hay estrías y arrugas helicoidales que forman siempre una espiral en dirección contraria a la de las agujas del reloj. En raras ocasiones, los *dos* dientes de un narval macho pueden crecer como colmillos. Cuando esto ocurre, se podría esperar que, como los cuernos de los moruecos y las cabras, un colmillo tuviera estrías hacia la derecha y el otro hacia la izquierda. Pero no; ambos colmillos las tienen invariablemente de la misma manera ihacia la izquierda! Esto ha confundido durante mucho tiempo a los zoólogos. Una teoría, propuesta por Sir D'Arcy Thompson en su famoso libro *On Growth and Form* (una edición abreviada fue publicada por Cambridge University Press en 1961), se basa en el hecho de que el narval nada hacia delante con un ligero movimiento de hélice hacia la derecha. La inercia del diente tendería a mantenerlo en su sitio, mientras el cuerpo se retorcía, dando de este modo al diente una torsión que le obligaría a girar lentamente en dirección contraria a las agujas del reloj cuando crece hacia delante.

«El cuerno no se retuerce en perfecto sincronismo con el animal –escribe Thompson–, pero el animal (por así decirlo) va lentamente,

poco a poco, girando ialrededor de su propio cuerno! El juego del movimiento, el intervalo, entre la cabeza y el cuerno, es ciertamente ligero; pero se repite con cada golpe de la cola. Se percibe en la raíz en crecimiento, la pulpa permanente, del diente y da una tensión o ejerce una torsión, en la base misma del diente y durante todo el proceso de calcificación.» La teoría de Thompson ha sido criticada, pero hasta ahora ningún biólogo parece haber encontrado otra mejor.

El narval es llamado a veces el "unicornio del mar", a causa de su único "cuerno". De hecho, durante los siglos XV y XVI los colmillos de esta criatura fueron vendidos en Europa, principalmente por los mercaderes escandinavos, como cuernos de verdaderos unicornios. Se creyó que los polvos hechos de tales cuernos tenían toda clase de milagrosas propiedades profilácticas. La leyenda fue rebatida por un zoólogo holandés a principios del siglo XVII.

Para qué finalidad sirve exactamente este diente gigante, sigue siendo hasta hoy un misterio. No hay prueba de que haya sido empleado alguna vez para traspasar como un puñal a enemigos, como pensaban los primeros zoólogos, o para horadar el hielo y hacer agujeros por donde respirar. Durante la estación del apareamiento, los narvales machos a veces cruzan sus cuernos unos con otros, como dos luchadores de esgrima; así pues, quizá la única finalidad del diente sea servir como parte de un ritual sexual.

Existen millares de otros sorprendentes ejemplos de asimetría en el reino animal: la forma en que se superponen las alas de grillos, saltamontes, cucarachas y otros insectos; las orejas asimétricas de ciertos búhos, que les facilitan la localización de sonidos; el *akita*, un perro japonés cuyo rabo se enrosca en los machos en un sentido y en las hembras en sentido contrario; la tendencia de los delfines a nadar en sus piscinas en sentido contrario al de las agujas del reloj; el órgano sexual asimétrico del chinche macho; un hongo llamado *laboulbeniales*, que sólo crece en la pata trasera izquierda de determinado escarabajo. Un zoólogo británico, A. C. Neville, ha recopilado muchos ejemplos más en su espléndido librito *Animal Asymmetry* (Edward Arnold, 1976).

El cuerpo humano, como los cuerpos de la mayor parte de los animales, tiene en conjunto una simetría bilateral, con pequeñas desviaciones de la simetría. El tema es lo bastante curioso y complicado como para exigir un capítulo aparte.

9. El cuerpo humano

La figura humana desnuda presenta una simetría bilateral casi perfecta. Buena parte de la seducción estética de un desnudo bien proporcionado, de carne y hueso o en una obra de arte, se debe a la identidad especular de los lados derecho e izquierdo del cuerpo. (La figura femenina no muestra asimetrías. La simetría masculina se rompe únicamente por el hecho curioso de que el testículo izquierdo suele pender ligeramente más bajo que el derecho.) Naturalmente, cualquier cuerpo individual puede tener pequeñas desviaciones de la simetría: un hombro más alto que otro, una columna vertebral ligeramente torcida, una cicatriz o marca de nacimiento en alguna parte del cuerpo, etc. Pero estas desviaciones, en su mayor parte, tienen tantas probabilidades de ocurrir en uno como en otro lado del cuerpo.

La simetría bilateral persiste en el interior del cuerpo, especialmente en los músculos y el esqueleto, pero queda rota en muchos lugares por la colocación sumamente asimétrica de varios órganos. El corazón, el estómago y el páncreas están a la izquierda; el hígado y el apéndice a la derecha. El pulmón derecho es mayor que el izquierdo. Las vueltas y giros de los intestinos son completamente asimétricos. El cordón umbilical humano, una magnífica hélice triple de dos venas y una arteria, invariablemente se enrosca en sentido contrario a las agujas del reloj. (Véase figura 22.)

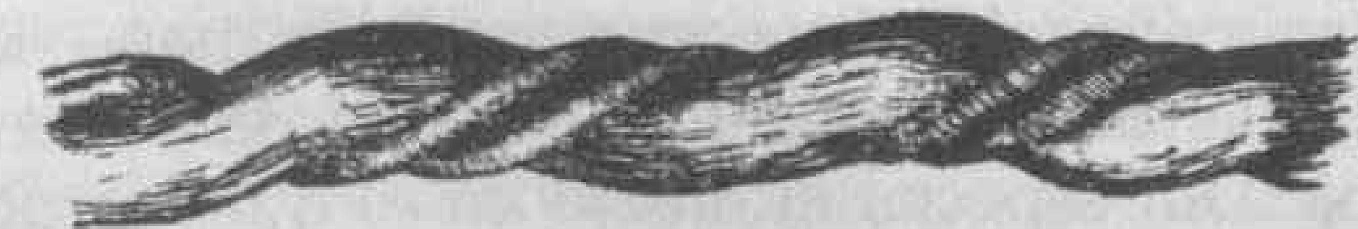


Fig. 22. El cordón umbilical humano.

Los gemelos corrientes, que son resultado de la fertilización simultánea de dos células ováricas distintas, tienen a veces rasgos asimétricos que van en una dirección en uno de ellos y en la contraria en el otro. Si son gemelos idénticos (que proceden de un solo óvulo que se divide poco después de la fertilización), esta tendencia a la imagen especular es más pronunciada. Los gemelos siameses –gemelos idénticos unidos uno al otro como resultado de una división tardía e incompleta del óvulo– son exactamente enantiomorfos en casi todos los detalles. Si uno es diestro, el otro es zurdo[1]. Si el pelo de uno en la coronilla de la cabeza se arremolina en la dirección de las agujas del reloj, el pelo del otro lo hace en sentido contrario. Diferencias en las orejas, irregularidades en los dientes, y otras, aparecen en ambos gemelos como imágenes especulares. Las líneas de la palma de la mano y las huellas digitales de la mano derecha de un gemelo son más parecidas a las de la mano izquierda del otro gemelo que a las de su propia mano izquierda. Lo mismo ocurre con la otra mano.

Aún más asombroso: uno de los gemelos siameses tendrá una "víscera transpuesta": sus órganos internos estarán invertidos, el corazón a la derecha y el hígado a la izquierda. Esta transposición de las vísceras o *inversus situs*, como se dice a veces, se encuentra siempre en uno de cada par de gemelos siameses, pero también puede darse en un individuo que nace solo. Es mucho más rara que la dextrocardia, en la que sólo están invertidos el corazón y los principales vasos sanguíneos. Cuando ocurre sin que haya gemelización, va unida generalmente a otras anormalidades físicas, como labio leporino, paladar partido o dedos adicionales en las manos y los pies. Los lectores que deseen saber más sobre los gemelos siameses y su asombrosa similitud especular pueden consultar el capítulo 5 de *Multiple Human Births*, de Horatio Hackett Newman (Doubleday, 1940), un libro fascinante, escrito llanamente por un famoso biólogo de la Universidad de Chicago, experto en gemelos.

Es interesante observar que Lewis Carroll, en *Through the Looking-Glass* (A través del espejo), hacía que Tweedledee y Tweedledum, la conocida pareja de gemelos idénticos, fueran como imágenes especulares uno de otro. Cuando los hermanos Tweedle querían estrechar las manos de Alicia, uno tendía la mano derecha, y el otro la mano izquierda. Si se estudian cuidadosamente las ilustraciones de Tenniel, en especial el dibujo en el que los dos gemelos, frente a frente, se disponen a luchar, se ve que están dibujados como si fueran enantiomorfos.

En la conducta y los hábitos de los seres humanos hay muchos ejemplos de acusada asimetría, los más evidentes derivados del hecho de que la mayoría de las personas son diestras. La mano derecha está controlada por el lado izquierdo del cerebro y la mano izquierda por el lado derecho, de modo que la destreza es en realidad un fenómeno de zurdera cerebral. En otro tiempo se pensaba que los niños nacían sin ninguna tendencia genética a favor de una u otra mano, y que la destreza de un niño no era más que el resultado de la educación de los padres. Esta opinión fue expresada vigorosamente por Platón.

«En el uso de la mano somos, por así decirlo, mutilados por la insensatez de nuestras nodrizas y madres –escribe Platón en el libro VII de sus *Leyes*–, porque aunque nuestros distintos miembros están por naturaleza equilibrados, nosotros creamos una diferencia en ellos por malos hábitos. Favorecer una mano sobre otra –sigue diciendo el filósofo griego– tiene poca importancia en tareas tales como tocar la lira, que debe ser sostenida por una mano y tañida por la otra. Pero en deportes como el boxeo y la lucha, especialmente en los combates cuerpo a cuerpo, es esencial que un hombre aprenda a usar las dos manos con igual habilidad. Por esta razón –argumenta– los niños deben ser educados para usar ambas manos indistintamente en todas las tareas.»

Hoy sabemos que Platón estaba lamentablemente equivocado. Como Aristóteles señala con razón, nuestros brazos *no* están equilibrados por la naturaleza. La tendencia innata de la mayoría de la gente a favorecer la mano derecha es universal en toda la raza humana y, hasta donde podemos remontarnos, la historia suministra pruebas fidedignas. La antropología cultural todavía tiene que encontrar una sociedad, o al menos una tribu local, en la cual la zurdera sea regla general. Los esquimales, los indios americanos, los maoríes, los africanos, todos son diestros. Los antiguos egipcios, griegos y romanos eran diestros. Naturalmente, si se retrocede bastante atrás en la historia, las pruebas a favor de la mano derecha son escasas e indirectas. Han de deducirse de indicios como las formas de las herramientas y las armas, o de los dibujos donde aparecen hombres en el trabajo o en la batalla. Al dibujar una cara de perfil, una persona diestra encontrará mas fácil dibujar la cara mirando hacia la izquierda, hecho que también sirve como un indicio de la "mano" del hombre prehistórico. Los antropólogos que han investigado esta cuestión en el hombre primitivo no están de acuerdo, de modo que no se puede llegar a conclusiones seguras, pero no

hay discrepancia sobre el predominio de la mano derecha en todas las sociedades desde que comenzó la historia documentada.

Las mismas palabras derecha e izquierda atestiguan en la mayoría de las lenguas la preferencia universal por la mano derecha. La palabra inglesa *right*, que significa derecha, justo o apropiado, sugiere que lo correcto es usar la mano derecha. Puede ser que *left* tenga su origen en el hecho de que la mano izquierda *(left hand)* se use tan poco que se la excluye *(left out)* de la mayoría de las tareas. Cuando se hace un cumplido malintencionado, se dice que es un *left-handed compliment* (falso halago). Siniestro, palabra que sugiere algo desastroso o maligno, procede de la palabra latina izquierdo; diestro, que significa mañoso, hábil, procede de la palabra latina derecho. La palabra francesa para izquierda es *gauche*, que significa también torcido o torpe. La palabra francesa para derecho es *droit*, que también significa justo, honesto, equitativo. La palabra inglesa *adroit* (diestro, hábil) está basada en la palabra francesa. En alemán, izquierda es *link*, y la palabra *linkisch* significa torpe, desmañado. La palabra alemana *recht*, derecha, significa también justo y fiel, como en inglés. En italiano la mano izquierda se llama *stanca*, que significa fatigada, o *manca*, que significa defectuosa. Los españoles hablan de la mano izquierda como *zurda*, y la frase española *a zurdas* significa del modo equivocado.

El protagonista de la novela *Patchwork Girl of Oz*, de L. Frank Baum, es un muchacho zurdo (como lo fue el propio Baum), llamado Ojo el Desgraciado. "Muchos de nuestros grandes hombres lo son", le dice a Ojo el Leñador de Hojalata. "Por lo general, ser zurdo es ser ambidextro; las personas diestras, normalmente sólo saben usar esa mano."

El cristianismo ha reforzado vigorosamente la identificación de maldad con zurdera. Es difícil hallar en la Biblia referencias de elogio a la mano izquierda. Cuando el padre de José bendice a los dos hijos de éste, confunde derecha e izquierda (con gran aflicción de José), e impone su mano derecha sobre el segundón, y no sobre el primogénito. Jesús habló de separar las ovejas de los machos cabríos en su segundo advenimiento, las ovejas a la derecha, los machos cabríos a la izquierda. Al diablo se le suponía zurdo. Se dice que hubo santos que rehusaron mamar del pecho izquierdo de sus madres cuando eran lactantes. Siempre que los pintores han tratado el tema del juicio final, han mostrado a Dios señalando al cielo con la mano derecha y al infierno con la izquierda.

No menos fuerza ha tenido este prejuicio en Oriente, muy especialmente en Japón. En las zonas rurales, era frecuente que los escolares zurdos fueran apaleados por sus maestros; las chicas zurdas tenían que fingir ser diestras para encontrar marido. En 1968, un psiquiatra de Tokio, Soichi Hakozaki, trató de combatir el prejuicio (que él consideraba causante de mucha ansiedad) con un libro titulado *Advertencias en contra de una cultura derechista*. La revista *Time* (7 de enero de 1974) informaba de que Hakozaki estaba satisfecho por la buena venta de su libro, pero temía que se trataba de "una larga batalla, cuesta arriba". Un signo esperanzador era que un disco de gran éxito en Japón se titulaba "Mi novio es zurdo".

Nadie sabe por qué toda la raza humana tiene esta tendencia innata a favor de la mano derecha. Los monos y simios, nuestros parientes más cercanos entre los primates, son ambidextros. Algunos vertebrados muestran una preferencia por la izquierda o por la derecha en determinadas circunstancias: perros de muestra que levantan una pata, loros que se sostienen en la percha sobre una pata, etcétera; pero todo esto es demasiado ajeno a la raza humana para ser importante. En algún momento del pasado geológico, cuando los primates comenzaron la larga transición hacia los caracteres humanos, algo comenzó a apartarles de estos hábitos simétricos. Se ha señalado que al luchar con un enemigo, el hombre primitivo pudo encontrar ventajas en llevar el cuchillo o la lanza en la mano derecha, porque tendría que recorrer una distancia mínima antes de traspasar el corazón de su adversario. Además, su lado izquierdo, más vulnerable, necesitaría la protección de un escudo. Este escudo sería sostenido naturalmente por la mano izquierda, dejando la derecha libre para empuñar el arma. A la luz de estos factores, una mutación en favor de la mano derecha pudo tener un ligero valor de supervivencia. Lee Salk tiene la teoría de que los recién nacidos necesitan oír el latido del corazón de la madre, y por ello las madres primitivas sostuvieron a sus niños con el brazo izquierdo, quedando el derecho libre para realizar las diversas tareas. Se han expuesto otras teorías de la dextralidad, pero sin apenas pruebas en que basarlas. La mayoría de los antropólogos lo consideran un misterio todavía no explicado de manera satisfactoria.

¿Qué porcentaje de la población actual es zurda? Parece una pregunta directa, sencilla; pero de hecho es vaga, hasta el punto de que casi no tiene significación. Se podría escribir un libro elemental sobre estadísticas, examinando críticamente la enorme y confusa literatura publicada sobre esta cuestión en las últimas décadas. En primer lugar, la incidencia de la zurdera puede variar de tiempo en

tiempo, de región a región. En segundo lugar, no es fácil definir exactamente lo que se considera zurdo. Es cierto que la mayoría de las personas son diestras, pero entre quienes no lo son, algunos son muy zurdos y otros débilmente zurdos; algunos son ambidextros, en el sentido de que hacen casi todas las cosas igual de bien con ambas manos y otros son también ambidextros, en el sentido de que son igual de torpes con la dos manos. Hay personas que realizan ciertas tareas especializadas con la mano derecha, y otras con la mano izquierda. No es raro encontrar una persona que escribe con una mano y come y hace todo lo demás con la otra. O viceversa. Por último, es sumamente difícil identificar a una persona que puede haber nacido con una predisposición hacia la mano izquierda, pero que nunca la mostró debido a que desde temprana edad fue educado para usar la mano derecha.

En vista de tales dificultades, no es sorprendente encontrar a los expertos en pleno desacuerdo acerca de la incidencia de la zurdera. En efecto, las estimaciones varían desde el 1 por 100 hasta más del 30 por 100. Uno de los más antiguos testimonios referentes a esta cuestión está en el Antiguo Testamento: *Jueces*, capítulo 20, versículos 15 y 16. El pasaje no es demasiado claro, pero parece decir que de 26.000 hombres en un ejército, fueron escogidos 700 zurdos porque "tiraban una piedra con la onda al ancho de un cabello y no erraban". El pasaje es interesante, porque sugiere que los zurdos eran extraordinariamente hábiles y porque da un porcentaje de zurdos aproximadamente del 2,7 por 100. Hoy, la mayoría de los estudios revela una incidencia mucho mayor. Muchos especialistas estiman que alrededor del 25 por 100 nacen zurdos, pero que las presiones del entorno, en un mundo dominado por la mano derecha, reduce la minoría zurda a una fracción mucho menor.

La revista *Newsweek*, en su número del 1 de octubre de 1962, incluía un cuestionario destinado a averiguar cuántos lectores leían habitualmente la revista de atrás adelante, y ver si esta práctica tenía alguna relación con la zurdera. En el número del 25 de febrero del año siguiente apareció un análisis de 5.800 respuestas: el 56,1 por 100 leían de delante atrás, y el 43,9 por 100 de atrás adelante. Si hemos de confiar en esta encuesta, es sorprendente que muchos occidentales hayan adoptado la costumbre de leer una revista de noticias de atrás adelante, la manera en que las revistas están destinadas a ser leídas en Oriente. Pero no hay una correlación significativa de esta costumbre con la zurdera. Entre los lectores que leían de atrás adelante, el 13 por 100 se declararon zurdos, el 85,1 por 100 diestros y el 1,9 por 100 ambidextros. Entre los que leían de delante atrás, el 12,4 por 100 eran zurdos, el 84,8 por 100 diestros y el 2,8 por 100 ambidextros. Así pues, del total de lectores de *Newsweek* que respondieron, alrededor de una octava parte eran zurdos.

Hay muchos indicios de que la frecuencia de la zurdera ha aumentado en Estados Unidos durante las últimas décadas. La mayoría de las autoridades en la cuestión creen que ello no se debe a que nazcan más zurdos, sino a que los padres son más transigentes en permitir a los zurdos que lo sean. Hace treinta o cuarenta años, los psicólogos decían a los padres que se podían producir toda clase de desórdenes nerviosos, especialmente la tartamudez, si a un niño zurdo se le enseñaba a usar la mano derecha para comer y escribir. El cambio no sólo pondría al niño en un estado de tensión emocional y rebeldía, sino que, como sostienen algunos especialistas, su cerebro estaría confuso sobre qué lado era el dominante, una confusión que implicaría a los centro cerebrales del lenguaje.

Actualmente los expertos coinciden en que la cuestión de la zurdera desempeña un papel sumamente secundario, si es que desempeña alguno, en la tartamudez y otros desórdenes nerviosos similares. Wendell Johnson, profesor de psicología y patología del lenguaje en la famosa clínica del lenguaje de la Universidad de Iowa, ha escrito un excelente libro, titulado *Stuttering and What You Can Do About It* (Tartamudez y lo que usted puede hacer sobre ello), en el que resume las sólidas pruebas que han llevado a los psicólogos a abandonar la teoría, antes sostenida ampliamente, de que existe una relación entre tartamudez y zurdera. Cuidadosos e importantes estudios han revelado que no hay tal relación.

El propio doctor Johnson tartamudeó en su niñez, y en su libro hay un apartado, a la vez divertido y triste, en el que describe la serie de vanos esfuerzos que hizo por curarse. Trató de sanar por la fe, de hablar con pequeñas piedras en la boca, fue tratado por un quiropráctico y pasó tres meses en una escuela de tartamudos, donde movía pesas de gimnasia mientras recitaba ciertas frases. Terminó yendo a la Universidad de Iowa, donde se ponía en marcha un nuevo programa sobre la tartamudez. Los psiquiatras encargados de este programa estaban convencidos de que la tartamudez tenía relación con la zurdera. Aunque no había la menor prueba de que Johnson no fuera sino fuertemente diestro, tan arraigada estaba la teoría, que durante diez años estuvo tratando de convertirse en zurdo, con fracaso total. Cuando en los años treinta comenzaron a co-

nocerse nuevos datos que demostraban que no existía una correlación entre tartamudez y zurdera, el propio Johnson apenas podía creerlo.

Las noticias de este nuevo punto de vista han ido llegando, lentamente a los padres de hoy. Muchos psicólogos infantiles aconsejan que si un niño no es fuertemente zurdo no se le causa ningún daño si amablemente se le induce, caso de que sea posible, a utilizar la mano derecha para comer y escribir. Pero si el niño es fuertemente zurdo es mejor permitir que siga siéndolo; no porque al obligarle a cambiar de mano se vaya a hacer de él un tartamudo, sino a causa de que ello le trastornaría emocionalmente y probablemente, en definitiva, no tendría éxito. El efecto que esa tensión emocional puede producir en un zurdo en manos de padres obstinados, es materia que todavía está siendo discutida.

La mayoría de los diestros lo son también de los pies, en el sentido de que suelen golpear una pelota con su pie derecho, pero en otros aspectos tienden a ser zurdos del pie. En situaciones en que el pie izquierdo es usado más a menudo, la tendencia puede relacionarse con la dextralidad manual. Al montar a caballo, por ejemplo, el hacerlo con la pierna izquierda permite al brazo derecho prestar mayor ayuda. Si se coge una pala con la mano derecha por el mango, para imprimirle mayor impulso, es más conveniente usar el pie izquierdo para clavar la pala en el suelo. Los muchachos diestros suelen montar en la bicicleta por la izquierda. Yo sospecho que la mayoría de los diestros, al saltar hacia delante, dejan que la pierna izquierda haga el trabajo muscular, pero no tengo estadísticas en qué apoyarme. Cuando una persona se pierde en un bosque, tiende a andar en círculo en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, aunque tiene la impresión de que camina en línea recta. Se han hecho intentos de correlacionar esto con el ser diestro o zurdo de los pies, pero los resultados no son concluyentes.

La mayoría de los diestros de la mano lo son también de los ojos, en el sentido de que en su visión domina el ojo derecho. Una sencilla prueba de la "mano" de los ojos es enfocarlos sobre un punto distante y después levantar un dedo hasta que una imagen de la yema del dedo (necesariamente desenfocada) coincida con el punto. Como hay dos imágenes del dedo desenfocado, una por cada ojo, usted tenderá a usar la imagen de su ojo dominante. Guiñando primero un ojo y después el otro usted puede decir qué imagen ha elegido. La mayoría de las personas emplean su ojo dominante para mirar por un microscopio o telescopio. Si el ojo dominante es el más usado para guiñar a alguien, es una cuestión sobre la que al parecer todavía no se han realizado investigaciones.

Para probar cuál es el ojo dominante en un niño pequeño, los oftalmólogos emplean toda clase de costosos instrumentos, pero usted puede hacer uno excelente en pocos minutos. Simplemente, enrolle una hoja de papel en forma de pequeño megáfono, y péguelo con cinta adhesiva para que no se desenrolle. Pida al niño que le mire a través del extremo *ancho* del megáfono. El ojo que *usted* vea a través del megáfono es el ojo dominante.

Los psicólogos han reunido también pruebas de que una persona diestra tiende a oír mejor por el oído derecho y a masticar con el lado derecho de las mandíbulas. También hay alguna prueba de que cuando un diestro manual lleva algo pesado sobre el hombro usa el hombro izquierdo. Por otra parte, al parecer no hay pruebas de que exista correlación entre ser diestro o zurdo y la manera cómo una persona aplaude, estrecha las manos y cruza los brazos o las piernas. En cada caso la maniobra tiene una forma de imagen especular. Cada persona escoge habitualmente sólo una de las dos formas (pruebe a estrechar las manos o cruzar los brazos de modo "equivocado" y observe qué raro se siente), pero esta preferencia no parece tener una estrecha relación con el hecho de ser diestro o zurdo.

Examinados superficialmente, los hemisferios izquierdo y derecho del cerebro humano parecen similares; pero una inspección más atenta muestra marcadas diferencias externas, que probablemente estén genéticamente determinadas. ¿Qué decir del interior del cerebro, ese misterioso miniordenador que procesa información por procedimientos que todavía nadie comprende? Se sabe ahora que los mecanismos interiores de los dos hemisferios cerebrales funcionan de modos sorprendentemente distintos.

Los hemisferios derecho e izquierdo están conectados por un gran haz de nervios, el llamado cuerpo calloso. Al seccionar este cable, las personas que padecen de formas extremas de epilepsia mejoran enormemente. En el decenio de 1950, Roger W. Sperry y sus colaboradores comenzaron una serie de ingeniosos experimentos con pacientes que habían sido sometidos a esta operación de "escisión cerebral". Muchos otros perspicaces investigadores se han adentrado, desde entonces, en este campo. Caben pocas dudas de que el hemisferio izquierdo es fundamentalmente el que se ocupa del lenguaje en todas sus formas: habla, audición, lectura y escritura de las palabras. También es el hemisferio izquierdo el que se encar-

ga, al parecer, del procesamiento secuencial de los datos, de manera análoga a como lo hacen los ordenadores digitales. Es el lado que piensa de modo lógico, analítico, matemático. El hemisferio derecho se ocupa más de las formas o estructuras, del reconocimiento de modelos holísticos, como melodías, obras de arte o la estructura del rostro humano. Parece que trabaja de manera paralela. Es el lado del cerebro donde se gestan las corazonadas, los golpes de intuición. Posiblemente es en ese lado donde se procesan las emociones.

Las investigaciones sobre escisión cerebral no han hecho más que empezar; ello no obsta para que los psicólogos –y en especial los parapsicólogos– se permitan escribir sobre este tema montañas de disparates, basándose en argumentos simplistas, que van mucho más allá de los hechos comprobados y les dan pie para hilvanar caprichosas teorías. En un artículo humorístico que publiqué en mi sección de *Scientific American* (abril de 1975), describía yo un "motor psíquico", que giraba, bien en sentido horario, bien en el antihorario, al mantener una mano cerca de él. Varios parapsicólogos me dirigieron cartas perfectamente serias, donde sugerían que el sentido de rotación dependería de en qué hemisferio cerebral estuviera dominando la fuerza psi. En su libro sobre la clarividencia (*Mind-Reach*, 1977) Harold Puthoff y Russell Targ formulaban la conjetura (pág. 102) de que las funciones psíquicas sean facultad del hemisferio derecho. Semejante idea, que había sido ya propuesta por Robert Ornstein en su *Psychology of Consciousness*, se está popularizando rápidamente entre quienes creen en fenómenos psi. Los escépticos, les gusta decir, son ciegos a la realidad de psi porque en ellos domina el hemisferio izquierdo.

Dado que cada lado del cerebro controla la mitad contraria del cuerpo, algunos escritores de parapsicología han especulado que los individuos "psíquicos", al ser encefálicamente diestros, tienden a ser manualmente zurdos. ¿No es cierto, acaso, que Uri Geller, el más grande entre los "psíquicos" modernos, es zurdo? Pero la correlación, si es que existe entre dextralidad y zurdera y la división de tareas en el cerebro, es una cuestión que permanece oscura. Sin embargo, no hay duda de que los zurdos no lo tienen fácil en un mundo dominado por los diestros, como veremos en el próximo capítulo.

10. La minoría zurda

A menos que usted mismo pertenezca a la "minoría zurda", probablemente no se dará plena cuenta de hasta qué punto a un verdadero zurdo le resulta difícil funcionar bien en una sociedad dominada por la mano derecha. En muchos deportes que usan equipos asimétricos, el zurdo tiene la suerte de poder comprar artículos diseñados especialmente para él: carretes para pescar, guantes de béisbol, bastones de golf, bolas para el juego de bolos. En 1968 se inauguró en el West End[1] londinense un comercio llamado *Anything Left-handed*, Ltd. (algo así como "Cualquier cosa zurda"), donde se venden todos los aparatos disponibles para zurdos. Algunos bancos extienden talonarios de cheques especiales para zurdos. Un dentista zurdo puede adquirir un equipo dental que le permita estar a la izquierda del paciente. Todo esto está bien, pero en muchos aspectos el zurdo está todavia inevitablemente penalizado. Ha de escribir en una hoja de papel de izquierda a derecha. Si se sienta en la barra de una cafetería, sobre todo en Manhattan, donde los asientos están más juntos que en otras grandes ciudades, su brazo izquierdo está en perpetuo conflicto con el brazo derecho de su vecino. Las tijeras, los afiladores de lápices, los abrelatas, los tenedores para la ensalada, los batidores de huevos, las calculadoras y docenas de otros aparatos de uso corriente están diseñados para personas manualmente diestras y, por tanto, son difíciles de manejar para un zurdo. Las libretas en espiral tienen el alambre colocado de modo que causa al zurdo la máxima incomodidad.

Un zurdo está constantemente fastidiado en toda clase de otras pequeñas cosas por la predisposición hacia la derecha del mundo. Cuando toma el Metro la ranura para la ficha está en el lado derecho del torniquete. Cuando entra en una cabina telefónica, encuen-

tra que la puerta está diseñada para ser abierta con la mano derecha. Dentro de la cabina, hay un teléfono de monedas, con un auricular que ha de ser sostenido por la mano izquierda, dejando libre la derecha para depositar las monedas, marcar el número y tomar notas. ¿No se le ha ocurrido (si usted es diestro) que todos los relojes de pulsera están hechos para diestros? Trate de dar cuerda a un reloj de pulsera sujeto a su muñeca derecha y verá hasta qué punto resulta incómodo girar el resorte para darle cuerda con la mano izquierda. Los manuales de instrucciones están escritos invariablemente para diestros. Una muchacha zurda que quiera aprender a hacer punto, o un muchacho zurdo que desee hacer juegos de manos con los naipes, ha de traducir toda izquierda a derecha, y viceversa. Para saber más acerca de las tribulaciones de los zurdos en un mundo de diestros, véase el divertido *Left-Handed Book* (Evans, 1966), de James T. deKay.

En qué medida estos inconvenientes son importantes para condicionar la personalidad, es otra cuestión sobre la que hay poco acuerdo entre los expertos. Durante el período en que estaba de moda identificar el tartamudeo y la zurdera, también estaba de moda relacionar toda clase de conductas neuróticas con la zurdera. Un ejemplo notable nos lo suministra la admirable biografía *The Life of Lewis Carroll* (La vida de Lewis Carroll), por Florence Becker Lennon, publicada en 1945 y revisada y reeditada en 1962 como libro de bolsillo de Crowell-Collier. Aunque no hay pruebas documentadas de que Carroll, manualmente diestro, hubiera nacido zurdo, miss Lennon deduce que así debía ser, sobre la base de su hábito de tartamudear toda la vida y el hecho de que su humor disparatado descansaba en gran medida sobre una técnica de inversión lógica. «Si Charles tuvo que sufrir esta inversión», escribe Lennon, «se tomó venganza haciendo por su cuenta un poco de inversión. La función de la persona zurda es, así, sostener el espejo, y aunque semejante carácter puede desarrollar como nota dominante, bien la testarudez, bien la perversidad, parece que en su adaptación Charles se inclinó más del lado de la perversidad que de la tozudez.»

La idea de que los zurdos tienden a ser tercos o perversos era muy creída en el pasado, pero pocos psicólogos contemporáneos la sostienen. La creencia alcanzó su punto culminante en las opiniones de los criminólogos del siglo XIX, en especial Cesare Lombroso, el psiquiatra y experto criminólogo italiano. Lombroso estaba convencido de que en las cárceles se encontraría una proporción más alta de zurdos que en la población general y escribió extensamente en

defensa de su opinión de que la zurdera era uno de los signos de degeneración del criminal nato.

En la actualidad las opiniones de Lombroso están consideradas universalmente como seudociencia, pero puede haber un poco de verdad en la relación entre crimen y zurdera, si ésta es interpretada como un fenómeno ambiental. En el siglo XIX, antes de que los padres comenzaran a ser tolerantes con la zurdera de sus hijos, pudo haber muchos penosos conflictos entre los hijos fuertemente zurdos y los padres que intentaban obligarles, pegándoles, a usar la mano derecha. Es fácil comprender cómo esos conflictos podían llevar a dificultades que predispondrían a una persona hacia el delito. Algunos modernos criminólogos que apoyan este criterio refieren que muchos delincuentes zurdos declaran en entrevistas haber sido castigados duramente por sus padres por usar su mano izquierda, aunque uno sospecha que los presos tienden a sacar partido de cualquier sugerencia que transfiera a otro la culpa de su conducta. Las estadísticas sobre esta cuestión son sumamente endebles. Se debe concluir que la correlación entre delito y zurdera, si es que existe tal correlación, es un tema que aún no está investigado adecuadamente.

En algunas profesiones hay una ligera pero indiscutible ventaja en ser zurdo; por esta razón se puede esperar encontrar en estas profesiones un número más alto de zurdos. Fijémonos en el béisbol. Se dice que un lanzador zurdo confunde a los bateadores diestros, y que un bateador zurdo (p. ej., Babe Ruth) confunde, de manera similar, a un lanzador diestro. Un bateador zurdo, a causa de que está a la derecha del puesto de saque, tiene de hecho que recorrer una distancia más corta hasta la primera base. Un *baseman* zurdo de la primera base tiene ventaja en tener la mano que coge a la derecha; esto le permite estar un poco más cerca de la primera base y cubrir todavía su porción del cuadro. En otros muchos deportes, como el tenis, el boxeo y, muy especialmente, la esgrima, el zurdo lleva ventaja cuando se enfrenta a adversarios diestros.

John Scarne, el experto en juegos, revela (en su libro *Scarne's Complete Guide to Gambling*, Simon and Schuster, 1961) que hay una gran incidencia de zurdos entre los talladores profesionales del juego del *blackjack* (veintiuna). La razón es bastante sutil. Un método común por el cual el tallador puede engañar al cliente consiste en atisbar de soslayo el número de la carta de encima. Puede entonces dar la carta de arriba o retenerla, dando subrepticiamente la segunda carta. Debido a que los indicadores de un naipe están si-

tuados asimétricamente (arriba en el ángulo izquierdo y abajo en el ángulo derecho), un tallador zurdo, que sostiene la baraja en su mano derecha, puede atisbar de soslayo mejor que si tuviera la baraja en la otra mano.

Un factor que puede contribuir a que haya una mayor proporción de zurdos en profesiones como el béisbol y la talla de naipes es el simple hecho de que en ciertas profesiones no hay *desventaja* en ser zurdo. Un niño fuertemente zurdo encuentra difícil escribir y dibujar con la mano izquierda. Es difícil ver lo que se escribe y que los dedos no emborronen la plana, en especial si se ha empleado tinta. Sólo unas pocas lenguas escritas, como el chino, el japonés, el hebreo o el árabe, van de derecha a izquierda de la página. Un niño zurdo podría muy bien aborrecer todas las actividades que impliquen escribir o dibujar mucho. En cambio preferiría materias como la música y los deportes, donde la zurdera o bien no importa o bien puede ser una ventaja. Desgraciadamente es difícil tener estadísticas precisas sobre la incidencia de la zurdera en las diversas profesiones. ¿Qué proporción de artistas y arquitectos son zurdos? ¿Qué proporción de violinistas? Los violines están destinados a ser tocados con el arco en la mano derecha, pero la izquierda también participa mucho, si no más. ¿Tienden los malabaristas profesionales a ser ambidextros? ¿Y los prestidigitadores? Sería interesante tener estadísticas sobre estas cuestiones.

En toda sociedad hay una amplia variedad de costumbres sociales que reflejan el predominio de la mano derecha: el estrecharse las manos, el juramento de fidelidad, el saludo, el jurar un cargo, el hacer gestos de carácter religioso, etc. Un zurdo tiene, claro está, que adaptarse a todo ello. El ir por el lado derecho de las aceras y escaleras, con consecuencias tales como la rotación en sentido contrario a las manillas del reloj de las puertas giratorias, parece más una convención que una práctica ligada a la dextralidad. La convención de conducir por el lado derecho de la carretera es casi universal en todo el mundo. Las Islas Británicas y la India son las principales excepciones, pero a estos países cada vez les resulta más difícil resistir a las presiones para que cambien. Los autos importados tienen el volante a la izquierda (para conducir por el lado derecho de la carretera), y los turistas, al entrar en conflicto con sus normas habituales, provocan continuos accidentes. Suecia, donde la tasa de accidentes provocados por los turistas era particularmente elevada, fue el último de los países europeos que pasó de conducir por la izquierda a conducir por la derecha. Cuando el gran cambio

entró en vigor, el domingo 3 de septiembre de 1967, tras cuatro años de difícil y minuciosa preparación, un diario de izquierdas de Malmoe celebró la ocasión imprimiendo una edición "de derechas", que era preciso leer de derecha a izquierda.

Al final de la novela *Lolita,* de Vladimir Nabokov, el protagonista, Humbert Humbert, conduce solitario por una carretera. Puesto que ha despreciado ya todas las normas de la humanidad, decide que igualmente podría despreciar las normas de circulación, y se desvía hacia el lado izquierdo de la calzada. La sensación es agradable. "Fue una placentera fusión del diafragma con elementos difusamente tangibles, intensificado todo ello por la idea de que nada podría acercarse más a la eliminación de las leyes físicas fundamentales que conducir deliberadamente por el lado prohibido de la calzada. En cierto modo fue un deseo vehemente, muy espiritual. Plácidamente, como en un sueño, sin rebasar los treinta kilómetros por hora, conduje por aquella curiosa imagen reflejada de mi mitad de carretera".

Tal vez sea la norma de circular por la derecha la que –al menos en Estados Unidos– subyace en la convención en tantos deportes de que el sentido del recorrido a través de la pista sea contrario al de las agujas del reloj: automovilismo, equitación, ciclismo, carreras de galgos, competiciones de patinaje sobre ruedas o sobre hielo, pruebas de atletismo en pista, etc. En béisbol, los jugadores recorren a toda carrera el circuito de las bases en sentido antihorario. Por lo general, los carruseles y tiovivos de feria giran en sentido antihorario. Como me escribía un corresponsal, Scot Morris, «parece que todo va en sentido contrario al de las agujas del reloj, salvo el reloj.» Aunque, como ha dicho alguien, incluso las manecillas del reloj van en sentido antihorario si su movimiento es observado desde el reloj.

¿Será posible que el conducir y caminar por la derecha nos esté habituando a mirar las cosas de izquierda a derecha? Al viajar en coche, el lado más cercano de la carretera, el que vemos con más facilidad, pasa de largo junto a nosotros, de izquierda a derecha. Al permanecer de pie en la acera, o al mirar por una ventana, vemos pasar el tráfico (suponiendo que la calle sea de doble dirección) de izquierda a derecha. ¿Será esto lo que hace que nos sintamos algo incómodos al ver a los caballos galopar por la pista en sentido contrario al habitual, o ver pasar el gentío a contramano si subimos a un tiovivo? Se me ocurre que para montar en marcha en un tiovivo es más fácil agarrarse con la mano derecha a una de las varas que con la mano izquierda, hecho que en un mundo de diestros podría

explicar su sentido de rotación. ¿Van los carruseles siempre en sentido antihorario, en todas las culturas?[2] ¿Se hace correr a los caballos en el hipódromo siempre en sentido contrario al de las manecillas del reloj, incluso en aquellos países donde los autos circulan por la izquierda? ¿En qué dirección recorrían los carros romanos el Circo Máximo? Sería instructivo disponer de estadísticas rigurosas, a nivel mundial, sobre estas cuestiones.

Las inscripciones antiguas se leen unas veces de izquierda a derecha y otras de derecha a izquierda. Los antiguos griegos tenían una curiosa forma de escribir, llamada *boustrophedon* ("como el buey se vuelve"), en la cual las líneas se alternan; una se lee de izquierda a derecha y la siguiente de derecha a izquierda, de modo que la vista sigue una trayectoria continua, serpenteante, de arriba abajo. Hoy la convención asimétrica de leer y escribir de izquierda a derecha es universal en todo el mundo occidental. Es difícil, para la mayoría de los diestros, escribir en la forma especular de derecha a izquierda y hay pruebas de que tal facultad es más fácil para las personas fuertemente zurdas. Leonardo da Vinci, un zurdo famoso, podía escribir al revés, como la imagen del espejo, con la misma facilidad, sino más, que del modo habitual. De hecho, escribía todos sus cuadernos de notas en esa forma especular, en parte para hacer más difícil leerlas a los curiosos.

Como experimento, tome usted un lápiz en la mano y vea si puede escribir su firma de derecha a izquierda de modo que se pueda leer correctamente en un espejo. ¿Es algo más fácil hacerlo cuando usted lo intenta con la otra mano? Si tiene usted acceso a un encerado, intente escribir su nombre simultáneamente con las dos manos, de izquierda a derecha con la mano derecha y de derecha a izquierda con la mano izquierda. Probablemente encuentre (si es usted diestro) que su mano izquierda hace esta tarea con más facilidad que cuando se emplea únicamente la mano izquierda. Otro truco para escribir su nombre al revés es colocar una hoja de papel sobre la frente y con la mano derecha escribir su firma del lado izquierdo de su cabeza al derecho. En el papel, claro está, la firma estará al revés.

Para hacer otro experimento interesante respecto a los hábitos derecha e izquierda, apile algunos libros frente a un espejo de tocador. La pila debe ser bastante alta, para impedir que usted alcance a ver una hoja de papel colocada encima del tocador, entre los libros y el espejo. En el papel se habrá dibujado antes una figura geométrica sencilla, por ejemplo una espiral o una estrella de cinco puntas. Mirando al espejo, intente repasar la figura, moviendo la

punta de un lápiz a lo largo de sus líneas. Le sorprenderá ver que no lo consigue. La razón es, naturalmente, que usted ha aprendido a coordinar sus manos con las imágenes del mundo que le dan sus ojos y su cerebro. Cuando esta imagen está reflejada, no es fácil a su cerebro contrariar los reflejos aprendidos y enviar a sus manos la señal correcta.

En todas las sociedades, el vestido tiende a seguir la simetría bilateral del cuerpo humano, aunque la costumbre puede determinar muchas absurdas desviaciones. En algunos casos pueden deberse a la dextralidad manual. Por ejemplo, la solapa con ojal en una chaqueta de hombre está siempre al lado izquierdo, a causa de que a una persona diestra le resulta más fácil ponerse una flor en la solapa izquierda que en la derecha. Por parecida razón, se puede suponer que las mujeres favorecen el lado izquierdo para los broches. Los anillos suelen llevarse en la mano izquierda, donde no estorban al estrecharse las manos o realizar las tareas culinarias. El pequeño bolsillo para las cerillas de una chaqueta está dentro del bolsillo derecho para llegar a él fácilmente con la mano derecha.

Una curiosa costumbre derecha-izquierda en el mundo occidental se relaciona con la manera en que se abrochan las chaquetas y abrigos de hombres y mujeres. En los trajes de hombre se sobrepone la izquierda sobre la derecha, con los botones en el lado derecho y los ojales en el izquierdo. En los abrigos de las mujeres ocurre lo contrario. Los abrigos cruzados, llamados trencas, a veces tienen botones y ojales a ambos lados, de modo que pueden ser llevados por un hombre o una mujer. Naturalmente, un hombre los abrochará de un modo y una mujer del otro. En 1963, ésta fue la base para la primera clave en un misterioso asesinato de la serie de televisión de Perry Mason. El asesino había saqueado los bolsillos de la víctima y después había vuelto a abotonar la trenca del muerto. Bette Davis (la abogado que sustituía al enfermo Perry Mason) resolvió el caso al darse cuenta de que la trenca había sido abrochada en la forma en que lo hace una mujer. Esto la convenció de que el principal sospechoso, un hombre, era inocente.

EJERCICIO 7: *¿En qué falla el razonamiento de Bette Davis?*

Así concluye nuestro examen de la simetría derecha-izquierda en las estructuras físicas y biológicas en gran escala. En el capítulo siguiente haremos una primera incursión en niveles microscópicos y submicroscópicos, donde la asimetría derecha e izquierda es tan omnipresente como en el mundo macroscópico.

11. Cristales

Nuestra exploración de la simetría y la asimetría en la naturaleza comenzó con el mayor de los objetos naturales, el Universo mismo; después fuimos descendiendo gradualmente por la escala del tamaño a estructuras cada vez más pequeñas. Dos de los anteriores capítulos se referían a la simetría general de las plantas y los animales. Llegados a este punto, dirigimos nuestra atención hacia estructuras aún más pequeñas, las diversas subunidades que componen todas las sustancias materiales, animadas e inanimadas.

Antes de ir más lejos será conveniente tener una idea clara de qué son exactamente éstas subunidades. Comenzando por las más pequeñas y ascendiendo después, la escala es como exponemos seguidamente:

1. *La partícula elemental.* Ésta es la unidad de estructura más pequeña que se conoce. Las partículas elementales más importantes, por ser las unidades de la materia ordinaria, son el protón, el neutrón y el electrón.

2. *El átomo.* Ésta es la unidad estructural más pequeña en que puede ser dividida la materia y que sigue conservando las propiedades de la materia. En el centro de cada átomo está el núcleo, que debe contener al menos un protón, pero por lo general contiene una mezcla de protones y neutrones. En torno al núcleo, dispuestos en capas, están los electrones. El átomo más sencillo, el de hidrógeno, tiene un núcleo de un protón, en torno al cual circula un solo electrón. El átomo más complicado que se encuentra en la naturaleza (en el laboratorio pueden crearse otros más complicados) es el de uranio, que tiene 92 electrones.

Los protones tienen una carga eléctrica positiva, y los electrones una carga negativa. Los neutrones, como su nombre indica, son neutros, no tienen carga eléctrica. De ordinario el número de protones de un átomo es el mismo que el número de electrones, de suerte que las cargas se equilibran entre sí y el átomo mismo es eléctricamente neutro. Si un átomo pierde un electrón de su envoltura exterior queda cargado positivamente. Si gana un electrón adicional en su envoltura exterior, queda cargado negativamente. Los átomos con carga eléctrica se llaman *iones*.

3. *La molécula.* Ésta es la unidad estructural más pequeña en que puede ser dividida una sustancia química y que sigue teniendo las propiedades de esa sustancia. Cuando la sustancia se compone por entero de un solo tipo de átomos, la sustancia se llama *elemento*. En los casos de ciertos gases raros, como el helio y el neón, la molécula es sencillamente un átomo, pero por regla general una molécula contiene dos o más. La molécula de hidrógeno, por ejemplo, está compuesta por dos átomos de hidrógeno, y una molécula de oxígeno tiene dos átomos de oxígeno.

Cuando átomos de diferente género están unidos, formando una molécula, la sustancia se llama *compuesto*. El agua ordinaria es un compuesto. Su molécula contiene dos átomos de hidrógeno unidos por enlaces químicos con un átomo de oxígeno. Los átomos de la molécula de un compuesto pueden variar en número, desde dos o tres hasta las decenas de miles de átomos que forman una sola molécula de una proteína compleja.

4. *La unidad cristal.* Cuando las moléculas de cualquier sustancia sólida se disponen según un patrón geométrico fijo, la sustancia se llama cristal. El patrón sigue repitiéndose por toda la sustancia, como el dibujo bidimensional de un papel de pared o de un piso de linóleo. Lo mismo que podemos mirar al papel pintado, señalar un motivo del dibujo y decir: "Esta es la unidad fundamental que se va repitiendo", podemos examinar la organización tridimensional de un cristal y encontrar un patrón fundamental de moléculas que se repite sistemáticamente.

El cristal es el peldaño más alto de la escala de la estructura de la materia. Claro es que podemos hablar de unidades aún mayores, como los minerales y rocas, pero en su descripción no entra un nuevo tipo de patrón matemático. Un mineral es sólo un elemento o un compuesto, en forma sólida, que se encuentra en la naturaleza, y no es resultado de algún proceso vital. Si un mineral presentara una estructura geométrica, sería una estructura cristalina derivada de la disposición de sus moléculas. Las rocas son simplemente mezclas de

uno o más minerales diferentes. Claro es que las rocas ofrecen a veces cierto género de diseño, como los estratos horizontales de las rocas sedimentarias, pero el diseño es de orden tan bajo que las cuestiones de simetría, del tipo que nos interesan, no entran en la descripción.

Después de este rápido examen de los cuatro niveles de estructura, podemos volver a nuestra exploración de la simetría especular. Comenzaremos, en lo más alto de la escala, por la estructura de los cristales; después, en capítulos posteriores, iremos descendiendo hasta la maraña subatómica de las partículas elementales.

Únicamente los sólidos tienen estructuras cristalinas. Las moléculas de un gas están tan separadas unas de otras que son libres para moverse hacia uno y otro lado; es imposible encontrar en ellas una disposición geométrica ordenada. Las moléculas de un líquido están más próximas, pero todavía tienen suficiente libertad de movimiento para impedir la formación de patrones fijos. Por el contrario, los sólidos tienen moléculas que se unen estrechamente, creando una estructura rígida y estable. (De hecho, en un sólido los átomos continúan oscilando, pero las fuerzas electromagnéticas los sujetan tan fuertemente que oscilan en torno a posiciones fijas. Para nuestros propósitos podemos suponer que los átomos no se mueven.) En casi todos los casos, tal disposición de las moléculas está hecha con arreglo a un patrón. Este diseño ordenado es la estructura cristalina del sólido.

Fijémonos en el agua. En sus formas gaseosa (vapor) y líquida, sus moléculas se encuentran en un estado de desorden; pero cuando el agua se congela, formando un sólido, las moléculas se agrupan por sí mismas en un patrón. El bello cristal de nieve, de simetría hexagonal como un dibujo en un calidoscopio, toma su figura directamente del patrón cristalino subyacente de las moléculas de hielo. A causa de este patrón subyacente, el hielo ordinario, desde los cubitos de hielo en el frigorífico a los gigantescos icebergs del Ártico, tiene una estructura cristalina.

Casi todas las sustancias sólidas son cristalinas. El vidrio es una de las excepciones notables. Está formado por el enfriamiento de ciertos líquidos, tan rápidamente que las moléculas se hielan en posición estrechamente apretada antes de tener la posibilidad de disponerse ordenadamente. «Sólido o no –escriben Alan Holden y Phyllis Singer en su excelente libro *Crystals and Crystal Growing* (Anchor, 1960)–, un vidrio no es cristalino. La ponchera de vidrio tallado, que es "cristal" para el tendero, no es cristal para el físico.

Los adivinos que acostumbraban a mirar el futuro a través de esferas bruñidas de un solo gran cristal de cuarzo, hoy suelen mirar a través de esferas de vidrio, porque son más baratas. Sería interesante saber si el futuro aparece igual de claro a través de un material desordenado que de uno ordenado.»

Los sólidos no cristalinos se llaman *amorfos;* algunos químicos hablan de ellos como "líquidos sólidos" a causa de que, como los líquidos, carecen de estructura cristalina. El carbón de leña, los alquitranes y ciertos plásticos son otros ejemplos conocidos. Tales sustancias participan con los líquidos de una tendencia a "fluir", aunque el flujo puede ser sumamente lento. Incluso el vidrio mismo fluirá, perdiendo su figura si se le deja durante unos cuantos cientos de años.

El patrón geométrico subyacente de toda sustancia cristalina se llama *retícula* de esta sustancia. A veces la retícula es una ordenación de átomos, a veces una ordenación de moléculas. El anhídrido carbónico, por ejemplo, se encuentra en la naturaleza como gas, formando parte de la atmósfera. Cuando su temperatura es lo bastante baja se congela y forma lo que se conoce como "hielo seco". (Se llama "seco" a causa de que nunca se funde como el hielo ordinario, convirtiéndose en líquido, sino que se transforma directamente otra vez en gas.) En el hielo seco las moléculas de anhídrido carbónico se agrupan formando la retícula de la figura 23. Las retículas

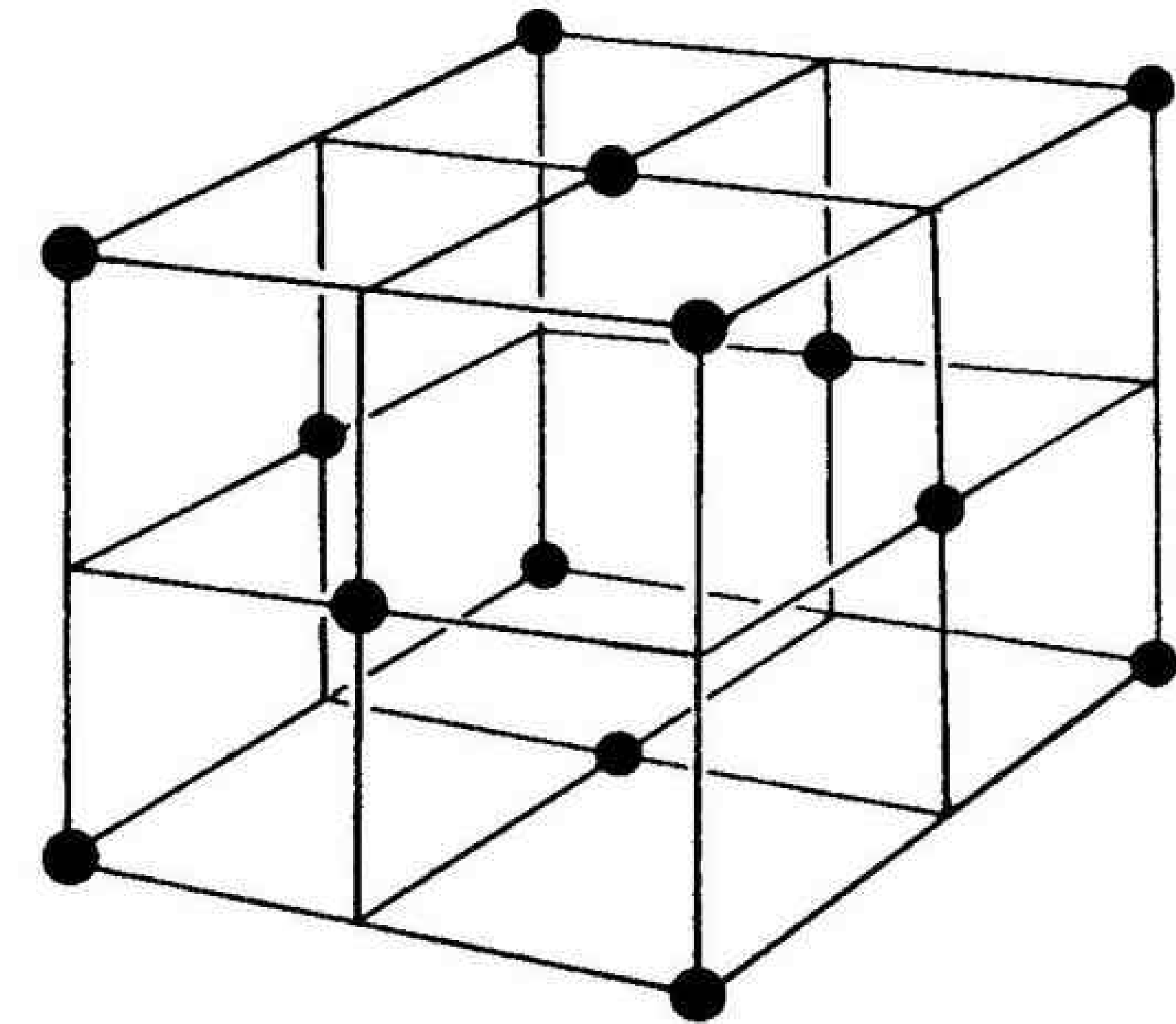


Fig. 23. La retícula cúbica centrada en las caras del "hielo seco". Cada unidad es una molécula de anhídrido carbónico.

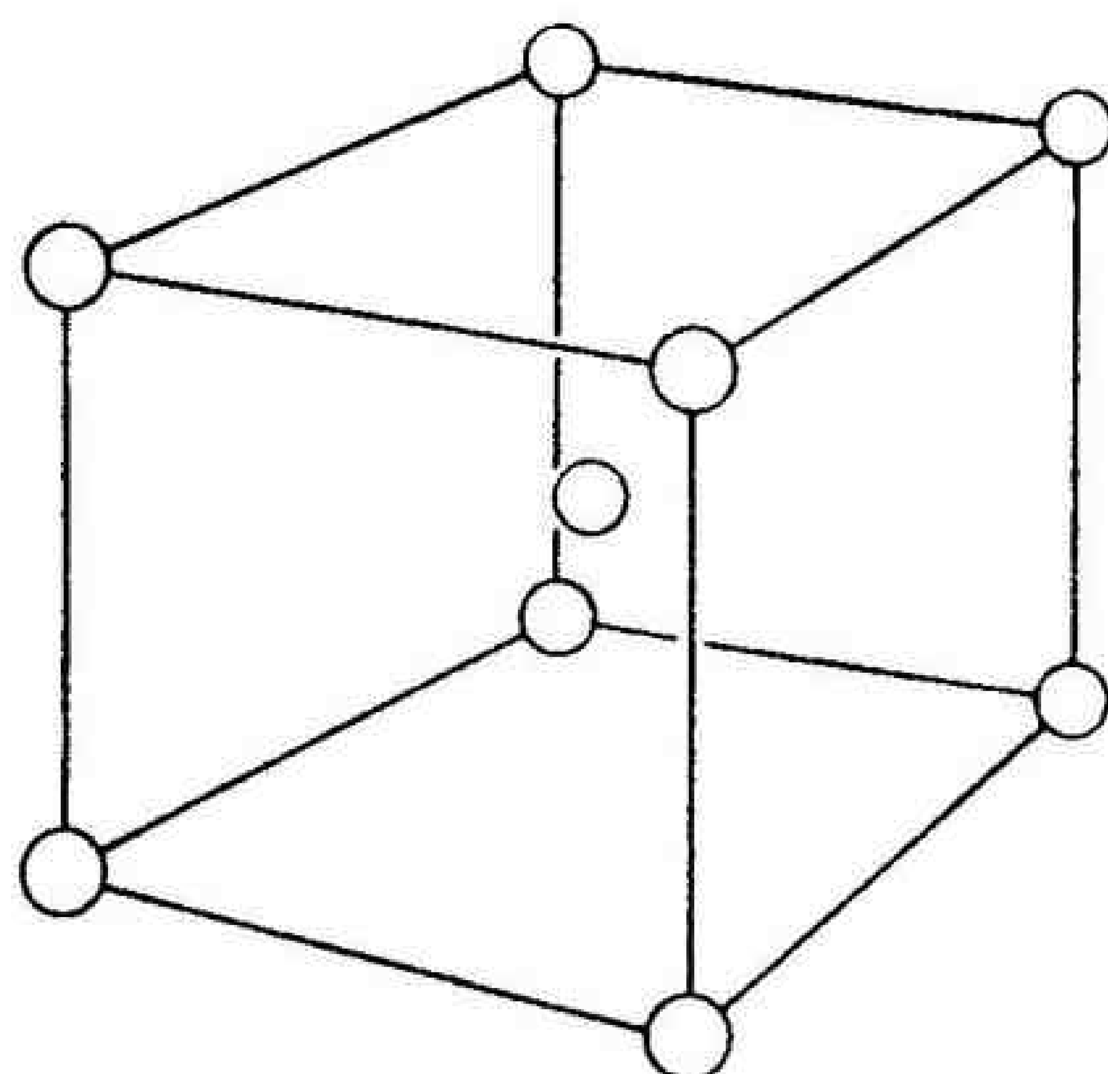


Fig. 24. La retícula cúbica centrada en el cuerpo del sodio metálico. Cada unidad es un átomo de sodio.

cúbicas, semejantes a la trama de las vigas de acero de un edificio de oficinas, son el tipo más sencillo de retículas. Las moléculas de cada cara del cubo dan a esta especial retícula el nombre de *retícula cúbica centrada en las caras.*

Una variedad diferente de retícula cúbica es la que aparece en la figura 24: la retícula cúbica *centrada en el cuerpo* (obsérvese la unidad en el centro del cubo). Ésta corresponde a un cristal de sodio metálico. Sus unidades son átomos de sodio.

El cloruro sódico, o sal común de mesa, tiene también una retícula cúbica de átomos (figura 25), pero son átomos que han sido ionizados. El sodio tiene solamente un electrón en su envoltura exterior. El cloro tiene siete electrones en su envoltura exterior, pero hay sitio para ocho; esto quiere decir que hay un sitio vacío en el cual puede encajar un electrón. Cuando los dos átomos se juntan, el solitario electrón del sodio salta al espacio vacante del cloro, y forma una molécula estable de cloruro sódico. A causa de que cada átomo en su retícula ha perdido o ganado un electrón, tiene una carga positiva o negativa. Como hemos dicho antes, ese átomo es un ion. Las unidades de ese cristal son iones.

La retícula de un cristal tiene gran influencia en la forma en que se presenta normalmente la sustancia. En el caso de la sal de mesa, los diversos planos de la retícula cúbica forman planos a lo largo de los cuales la sal tiende a escindirse fácilmente. Si se examina cuidadosamente la sal de mesa con una lupa corriente (desde luego es mejor un microscopio), se verá que los granos son en realidad pequeñísimos cubos. No se ve la unidad cúbica que aparece en el diagrama –queda por debajo de la amplificación del microscopio más potente–, pero se ven menudos cristales de sal que han adquirido una estructura cúbica a causa de la estructura cúbica de la retícula de la sal.

No se debe pensar que las estructuras de la retícula, por ser invisibles en el microscopio, no son más que construcciones teóricas que los físicos no han podido observar. En otro tiempo así fue, pero ahora hay muchas técnicas para "ver" realmente estructuras demasiado pequeñas para ser observables a la luz visible. Ya en 1912, el físico alemán Max von Laue desarrolló una técnica para observar la estructura reticular mediante los rayos X. Más recientemente se ha obtenido una precisión mayor disparando electrones, iones e incluso neutrones a través de los cristales. La portada del número de junio de 1957 de la revista *Scientific American* era una llamativa fotografía en color que mostraba la disposición de los diferentes átomos de la retícula del tungsteno. La fotografía había sido tomada con un nuevo instrumento llamado "microscopio de campo iónico", que au-

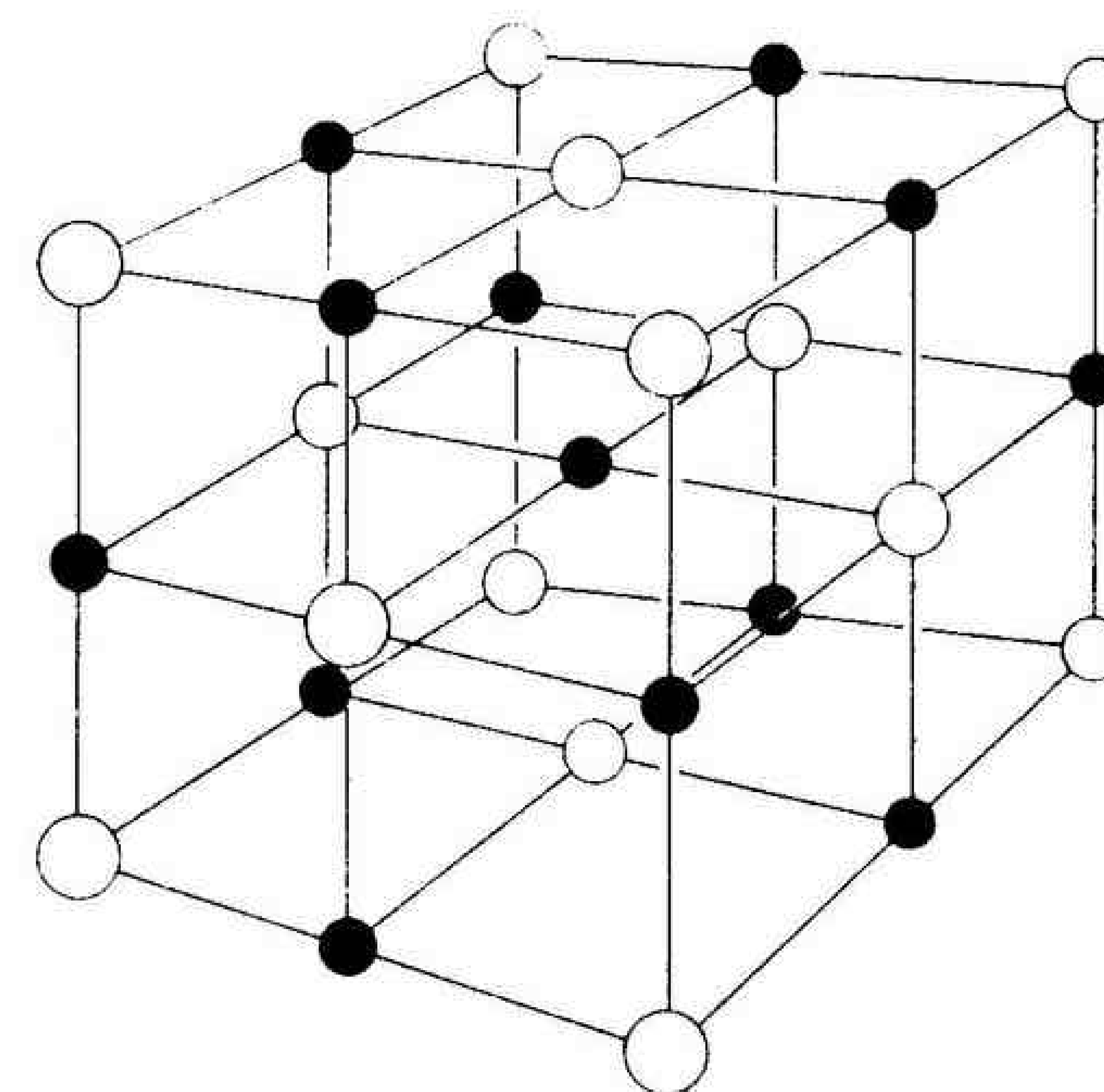


Fig. 25. La retícula cúbica de la sal de mesa. Los iones de sodio (en negro) alternan con iones de cloro (en blanco).

mentaba la retícula ¡unos dos millones de diámetros! Como se ve, estas estructuras no son conjeturas matemáticas; han entrado en el campo de la observación directa, relativamente sencilla.

Las tres retículas cúbicas descritas hasta ahora son simétricas en el sentido en que hemos venido usando la palabra; esto es, son superponibles a sus imágenes especulares. Además, las tres retículas tienen otros muchos tipos de simetría, que son estudiados en Cristalografía. Por ejemplo, tienen varias clases de *simetría de rotación*. Esto significa que si se la hace girar de determinada manera, en torno a ciertos ejes, la retícula, después de la rotación, es exactamente la misma que antes. Por ejemplo, si se pasa un eje a través del cubo, como se ve en la figura 26, se puede hacer girar el cubo llevándolo a cuatro diferentes posiciones que son exactamente iguales, punto por punto, en todos los rasgos del cubo. Ese eje se llama *cuádruple eje de simetría*. Es fácil ver que un cubo tiene tres de tales ejes.

Si se pasa un eje a través de un cubo como en la figura 27, el cubo puede girar en dos posiciones que son exactamente iguales. Tal eje se llama *doble eje de simetría*. El cubo tiene seis ejes de esa clase.

Los cristales pueden tener ejes de doble, triple, cuádruple y séxtuple simetría. Una retícula no puede tener una simetría quíntuple. Para enlosar un piso pueden emplearse triángulos, cuadrados y hexágonos, pero si se trata de enlosar con pentágonos regulares se encontrarán dificultades. Por una razón similar, las formas pentagonales no se encuentran nunca en los cristales tridimensionales. Son corrientes en el mundo viviente: la mayoría de las flores (p. ej., la primavera) y algunos animales (p. ej., la estrella de mar) exhiben simetría pentagonal, pero nunca encontraremos un cristal pentagonal. La estructura de la retícula subyacente de las sustancias cristalinas no puede tener, por las férreas leyes de la geometría, un eje quíntuple de simetría.

Hemos visto que un cubo tiene ejes dobles y cuádruples de simetría. No tiene un eje séxtuple de simetría. ¿Tiene un eje ternario? La mayoría de la gente se quedará asombrada cuando por vez primera se le dice que tiene cuatro de esos ejes.

EJERCICIO 8: *Trate de encontrar los cuatro ejes ternarios de simetría de un cubo. En otras palabras, cuatro ejes tales que, al hacer girar en torno a cada uno de ellos el cubo, éste puede ser colocado en tres posiciones, ni más ni menos, que son exactamente iguales, punto por punto.*

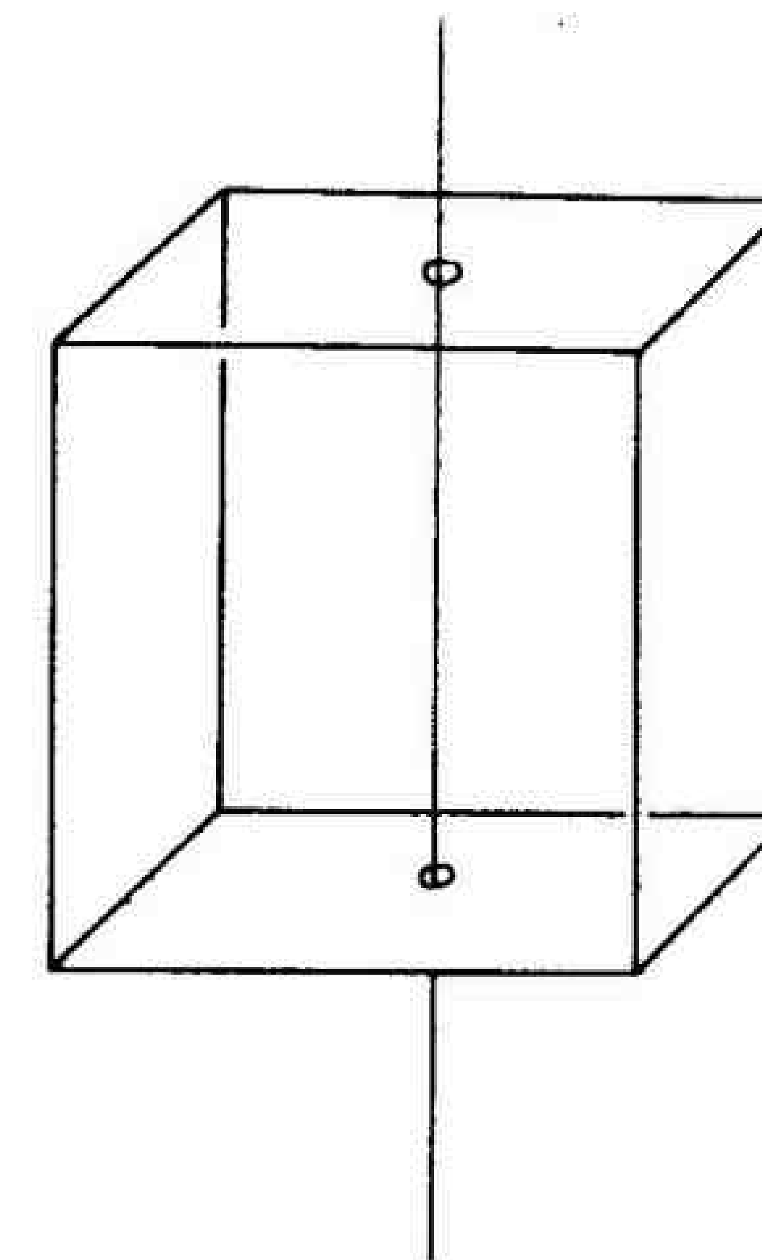


Fig. 26. Uno de los tres ejes cuádruples de simetría del cubo.

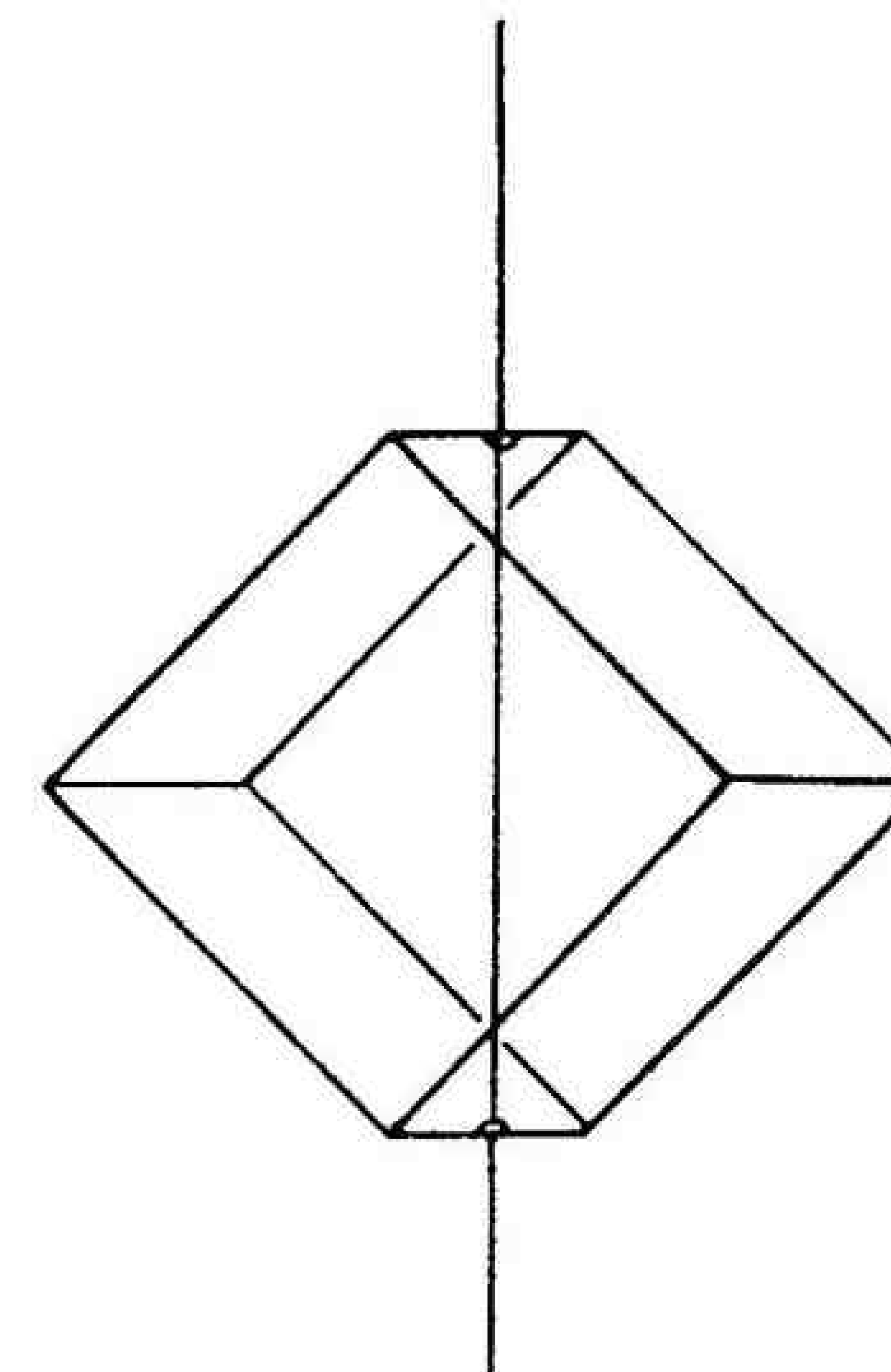


Fig. 27. Uno de los seis ejes dobles de simetría del cubo.

Todos estos ejemplos de simetría de rotación se llaman operaciones *realizables*, por la simple razón de que se las puede ejecutar de hecho. La simetría por reflexión se llama *no realizable*, a causa de que no hay modo de poder realizarla con un objeto sólido. Como hemos visto, un objeto de dos dimensiones sobre un plano puede ser reflejado cogiéndolo y volviéndolo, pero naturalmente para hacerlo tenemos que llevar el objeto de dos dimensiones a un espacio de tres. De la misma manera podríamos reflejar o "volver del revés" cualquier objeto sólido si pudiéramos llevarlo a través de un espacio de más altas dimensiones. Como no tenemos modo de hacerlo con un objeto real, en cristalografía se dice que la operación de reflexión es no realizable. Hay otros tipos de operaciones de simetría no realizables, pero ya hemos gastado más tiempo del necesario en estas operaciones. El tema de la simetría de los cristales es una cuestión complicada, absorbente, sobre la que se han escrito enormes libros; nosotros debemos resistir la tentación de entrar en más detalles. Este no es un libro sobre simetría en general. Nos interesan los cristales únicamente respecto a su simetría por reflexión especular; esto es, si poseen un plano de simetría y, por tanto, si son superponibles a su imagen en el espejo.

Muchos minerales se encuentran en forma de grandes masas irregulares que dan únicamente vagos indicios, si es que los dan, acerca de su estructura cristalina subyacente. Una feliz excepción es el diamante, una forma de carbono cristalino. Habitualmente se encuentra como un solo cristal, a menudo de gran regularidad. Su retícula subyacente, de forma cúbica, permite al diamante adoptar una gran variedad de formas cristalinas. La forma más común, como se ve en la figura 28, a la izquierda, es conocida en geometría como octaedro, o figura con ocho caras. Obsérvese que cada cara es un triángulo equilátero. Una figura sólida como ésta, compuesta de caras planas, se llama *poliedro*. Si se puede hacer girar de modo que cada cara quede plana sobre el tablero de una mesa, es un *poliedro convexo*. Cuando todas las aristas de un poliedro convexo tienen la misma longitud, y todos los ángulos son iguales, se le llama *poliedro regular*.

Hay exactamente cinco poliedros convexos: tetraedro, hexaedro (cubo), octaedro, dodecaedro e icosaedro. A veces se les llama los cinco *sólidos platónicos*, a causa de que Platón dijo algunas cosas interesantes sobre ellos. Se encuentran en todo tipo de lugares inesperados en la naturaleza; recientemente se descubrió que ciertos virus tenían forma de tetraedros, dodecaedros e icosaedros.

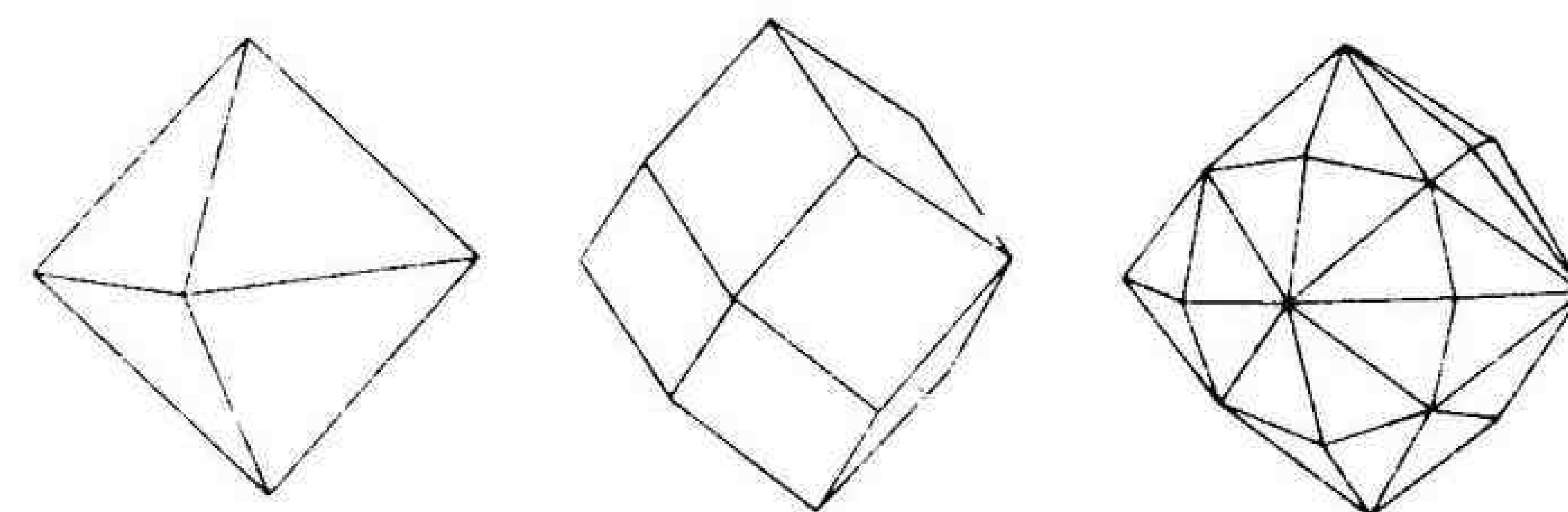


Fig. 28. Tres formas cristalinas naturales de diamante: octaedro, dodecaedro rómbico y octaedro hexakis (seis veces octaedro).

El dodecaedro rómbico (fig. 28, centro) y el octaedro hexakis (seis veces octaedro) (fig. 28, derecha) son otras dos formas cristalinas notables en que se encuentran a veces los diamantes. Estos tres tipos de cristales son simétricos; todos poseen muchos planos y ejes de simetría; su estructura procede en todos ellos de la estructura subyacente de la retícula del cristal. El diamante es la estructura reticular que toma el carbono cuando está sometido a gran presión. Sus átomos están tan juntos que es casi imposible forzarlos a apretarse más; ésta es precisamente la razón de que el diamante sea la sustancia natural más dura que se conoce. En forma de una retícula menos compacta, el carbono se convierte en grafito (como el que se emplea en los lápices), y cuando la estructura reticular desaparece completamente, el resultado es el carbón vegetal o el hollín. La diferencia entre el negro hollín depositado en las paredes interiores de una chimenea y el diamante que brilla en el dedo de una muchacha ¡no es más que una diferencia en el patrón que adoptan los átomos de carbono!

Una forma cristalina común, casi tan sencilla como el cubo, es el romboedro que aparece en la figura 29. Sus seis caras son exacta-

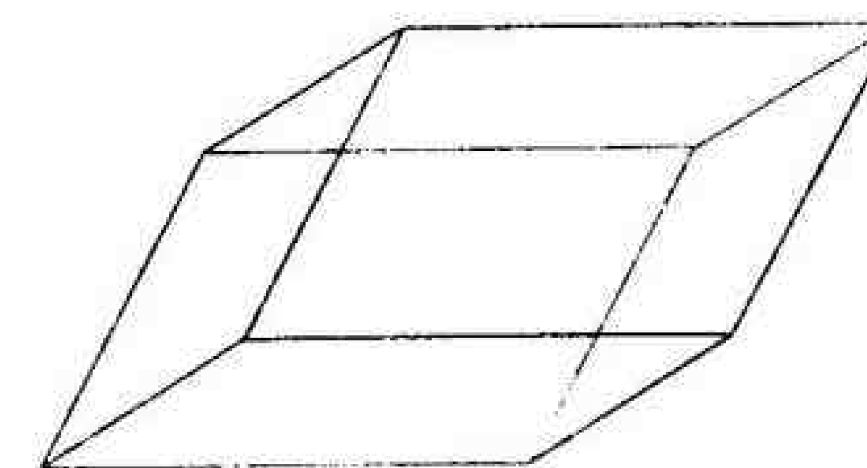


Fig. 29. El romboedro.

mente iguales, cada una un rombo, de suerte que todas las aristas tienen la misma longitud. Es como si usted tomara un cubo y lo deformara presionando sobre dos esquinas directamente opuestas. En esta forma se encuentran a menudo grandes cristales de calcita (carbonato cálcico); también los cristales de nitrato sódico. ¿Puede usted representarse visualmente la figura con bastante claridad para decidir si esta forma es simétrica o asimétrica?

EJERCICIO 9: *Sin hacer un modelo de cartón, trate de encontrar uno o más planos de simetría en el romboedro. Naturalmente, si encuentra sólo uno, la figura será simétrica y superponible a su imagen especular.*

Algunos cristales que se encuentran en la naturaleza tienen simetría de reflexión en su estructura reticular; otros no. El cuarzo, el más común de los minerales, tiene una retícula asimétrica que no se puede superponer a su imagen especular. El cuarzo es un compuesto llamado dióxido de silicio o sílice. Su retícula tiene una estructura helicoidal compuesta de átomos de silicio enlazados con el doble de átomos de oxígeno. A causa de que sus hélices pueden ir hacia la derecha o hacia la izquierda, el cuarzo tiene dos formas enantiomorfas. En la naturaleza adopta una enorme variedad de formas que raramente reflejan el carácter asimétrico de su retícula, pero pocas veces se encuentra un cristal asimétrico de cuarzo como el que aparece en la figura 30. El dibujo muestra ese cristal en sus dos formas de imagen especular.

Un rayo de luz oscila normalmente hacia delante y atrás a lo

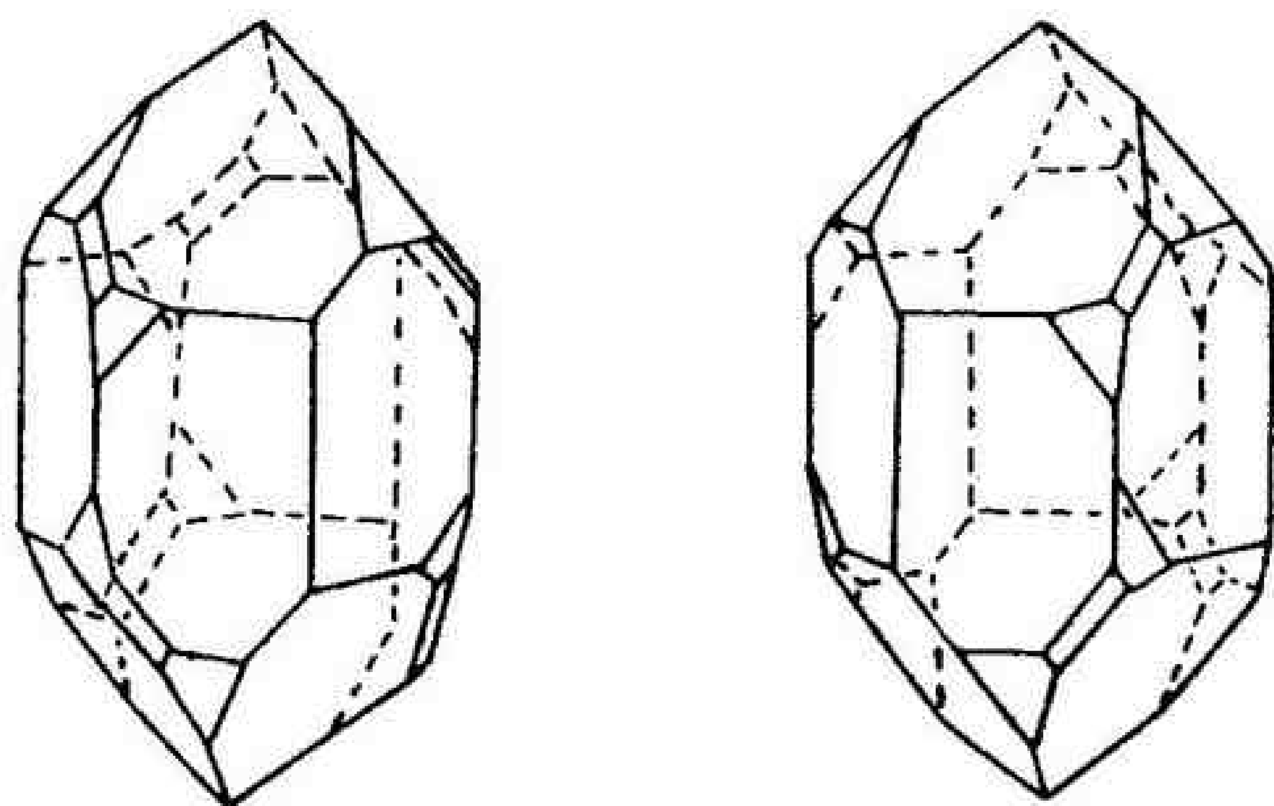


Fig. 30. Cristales de cuarzo de retícula hacia la derecha e izquierda.

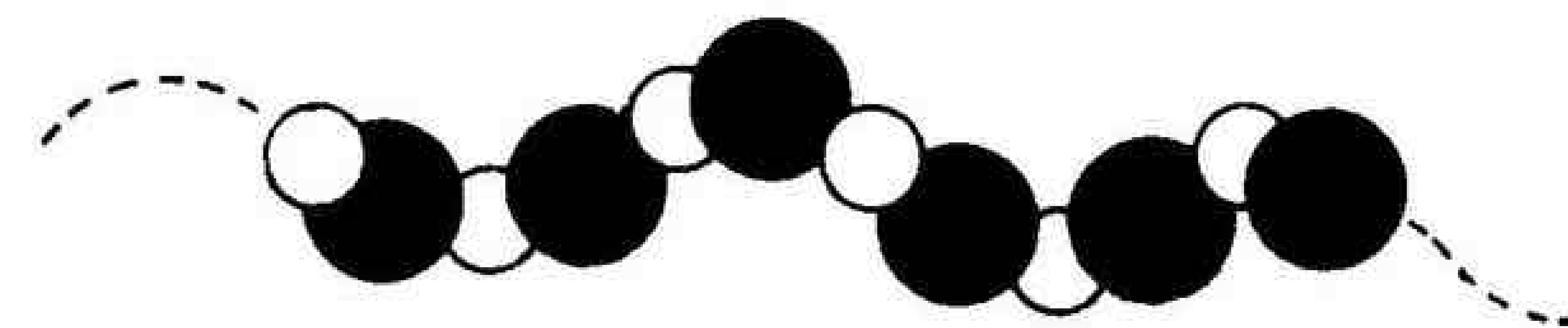


Fig. 31. Retícula helicoidal del cinabrio. Los átomos de mercurio (en negro) alternan con los átomos de azufre (en blanco).

largo de todos los planos que pasan por su eje. Pero cuando la luz pasa a través de ciertos cristales, como el espato de Islandia (una forma transparente de la calcita, o carbonato cálcico), la retícula cristalina del mineral no permite a la luz oscilar más que en un solo plano. La luz que de esta suerte ondula a lo largo de un solo plano se llama luz polarizada. Cuando un plano de luz polarizada es enviado a través de cuarzo transparente, la asimetría de la retícula del cuarzo hace que el plano de la luz vire fuertemente en la dirección de las agujas del reloj o en sentido contrario. Tenemos así un método sencillo para comprobar la simetría derecha-izquierda de muchas retículas cristalinas. El cinabrio (sulfuro de mercurio), un mineral rojizo que es la principal mena del mercurio, hará girar un plano de luz polarizada muchos más grados que el cuarzo. Su retícula asimétrica consiste en cadenas helicoidales de átomos de mercurio y azufre alternados, que se enroscan a la derecha o la izquierda en la forma que muestra la figura 31.

Si bajamos ahora el tercer peldaño de la escala, la molécula, se suscita una cuestión: las moléculas mismas, consideradas como unidades individuales, aparte de toda retícula cristalina en la que pueden estar engranadas ¿tienen siempre estructura simétrica? Si es así, tanto si el compuesto se encuentra en la naturaleza como si se crea en un laboratorio, sus moléculas siempre serán las mismas, y el compuesto tendrá siempre las mismas propiedades. Pero si ciertas moléculas son una *estructura asimétrica* de átomos se podrían encontrar o crear en el laboratorio dos formas absolutamente diferentes de exactamente el mismo compuesto. Una forma contendría sólo moléculas orientadas hacia la derecha, la otra, únicamente moléculas orientadas hacia la izquierda. Las dos sustancias serían idénticas en todos los aspectos, excepto que las moléculas de una serían la imagen especular de las moléculas de la otra.

Existen tales moléculas. Son las llamadas *estereoisómeras*. En el próximo capítulo relataremos la dramática historia de su descubrimiento.

12. Moléculas

La historia del descubrimiento de moléculas orientadas hacia la derecha o hacia la izquierda comenzó en Francia en la primera mitad del siglo XIX. Jean Baptiste Biot, físico y químico francés de fama mundial, descubrió que los cristales de cuarzo tenían la facultad de hacer virar un plano de luz polarizada. Una sustancia capaz de hacerlo se dice que es *ópticamente activa*. Como hemos visto en el capítulo anterior, a veces se encuentran en la naturaleza grandes cristales de cuarzo de formas asimétricas. Fue fácil para Biot determinar que si uno de esos cristales hace girar un plano de luz polarizada en el sentido de las agujas del reloj, un cristal que sea su imagen especular hará girar el plano en la otra dirección. Además, observó que si los cristales de cuarzo son disueltos, la solución no hace girar la luz polarizada. Es ópticamente *inactiva*. ¿Cómo se puede explicar este hecho? Muy sencillamente. La facultad del cuarzo de polarizar la luz debe de proceder no de la asimetría *en el seno* de las moléculas, sino de algún tipo de estructura asimétrica mayor formada por las moléculas mismas, siempre que el cuarzo está cristalizado. Esta estructura mayor es, naturalmente, la retícula asimétrica del cristal de cuarzo.

Biot hizo otro descubrimiento no tan sencillo de comprender. Vio que soluciones de ciertos compuestos orgánicos como el azúcar y el ácido tartárico, sustancias obtenidas de seres vivos, ¡son también ópticamente activas! ¿Por qué el signo de exclamación? Porque en una solución no hay retícula cristalina capaz de hacer virar la luz polarizada. Luego el giro tiene que provenir de algún tipo de asimetría dentro de la estructura de cada molécula individual. Biot no tenía medio de probarlo, pero parecía una idea razonable.

Los trabajos de Biot sobre la actividad óptica de las sustancias

orgánicas, y las conjeturas que aventuró sobre ellas, fascinaron a un joven químico francés llamado Louis Pasteur. Años después Pasteur se haría famoso en el mundo por sus grandes contribuciones a la ciencia médica, pero por entonces era un joven de poco más de veinte años que comenzaba su carrera.

Pasteur vio que el ácido tartárico, un compuesto que se encuentra en las uvas y otras frutas, siempre hacía virar la luz polarizada de cierta manera. Vio también que había otra forma de ácido tartárico, llamada ácido *racémico*, que era ópticamente inactiva. Los químicos observaron que las dos sustancias eran exactamente iguales en todas sus propiedades, excepto en una: la facultad de hacer virar la luz polarizada. El ácido tartárico la hacía virar, y el ácido racémico no. ¡Era realmente una curiosa situación! ¿Cómo pueden dos cosas ser exactamente iguales en todos los aspectos y, sin embargo, diferir en la manera como transmiten la luz? Pasteur sólo podía imaginar una explicación. Biot debía de tener razón. Debía de haber alguna diferencia de lateralidad en la estructura de las moléculas.

A partir de esta hipótesis, Pasteur comenzó un estudio exhaustivo de las formas cristalinas de los ácidos tartárico y racémico. Encontró que los cristales de ácido tartárico, examinados cuidadosamente al microscopio, son asimétricos; además, todos los cristales son asimétricos de la misma manera. Todos están orientados en la misma dirección. Pero los cristales de ácido racémico son una mezcla a partes iguales de cristales orientados hacia la derecha y cristales orientados hacia la izquierda. ¡La mitad de los cristales son idénticos a los cristales del ácido tartárico, y la otra mitad son formas enantiomorfas! (Véase la figura 32.)

No es difícil suponer lo que Pasteur hizo después. Con gran cuidado y paciencia, usando diminutos instrumentos que podía obser-

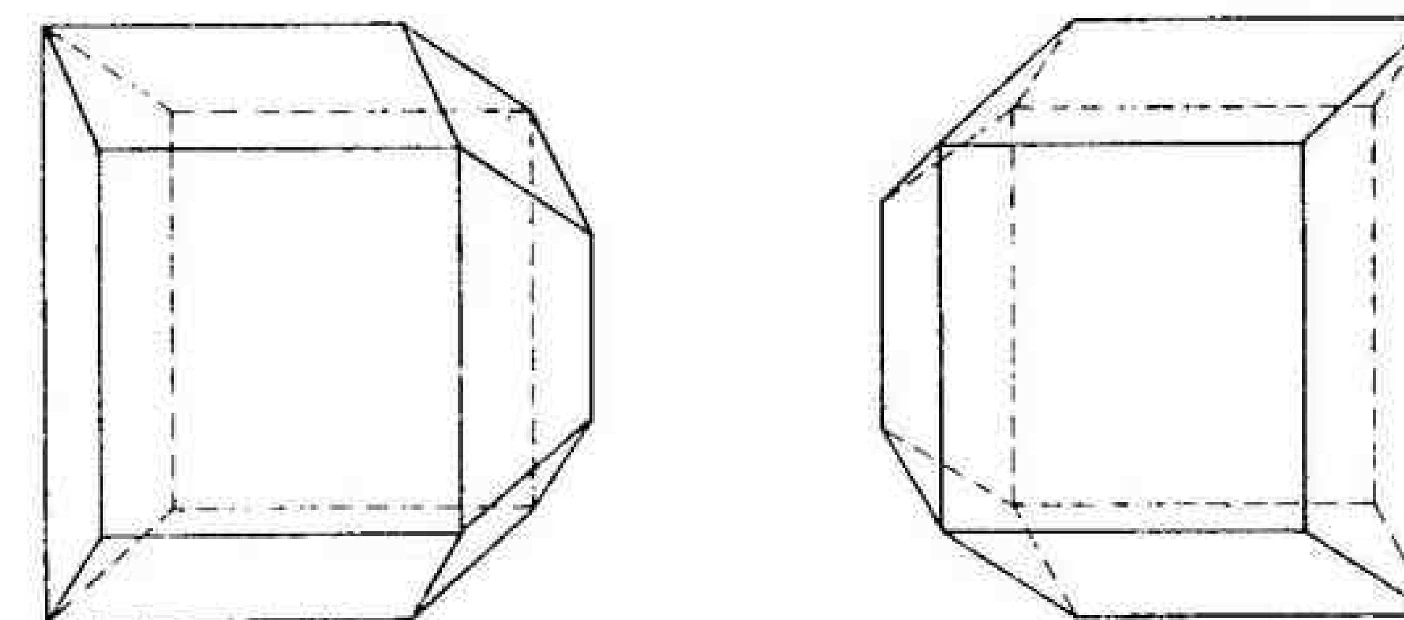


Fig. 32. Cristales de ácido tartárico de orientaciones opuestas.

var a través del microscopio, separó los cristales de una "mano" de los cristales de la "mano" contraria. Cuando preparó una solución de un tipo de cristales vio que era idéntica en todos los aspectos al ácido tartárico extraído de las uvas. Hacía virar un plano de luz polarizada en la misma dirección que lo hacía el ácido tartárico natural. Al preparar una solución similar empleando el otro tipo de cristal, también obtuvo un ácido tartárico ópticamente activo, pero con una importante diferencia. ¡Hacía virar la luz polarizada en la otra dirección!

«Pasteur sintió tanta emoción –escribe René Dubos en su *Pasteur and Modern Science* (Anchor, 1960)– que se precipitó fuera del laboratorio y al encontrar a uno de los ayudantes de química en el vestíbulo lo abrazó exclamando: "Acabo de hacer un gran descubrimiento... Soy tan feliz que estoy temblando de arriba abajo y soy incapaz de poner mis ojos otra vez en el polarímetro".» Como Dubos señala, para apreciar la grandeza del descubrimiento de Pasteur debemos recordar que su laboratorio era pequeño y primitivo, y que había estado trabajando en ello solamente durante dos años. Tenía que preparar todos sus productos químicos, construir su propio equipo. «No tenía ayuda –escribe Dubos–; tan sólo el aliento de sus maestros y compañeros y la fe en su destino.»

El descubrimiento de Pasteur confirmó la sospecha de Biot sobre la asimetría de ciertas moléculas. Cuando el anciano oyó hablar del descubrimiento del joven químico, inmediatamente envió a buscar a Pasteur y le pidió que repitiera, ante sus ojos, el experimento que había realizado con los ácidos tartárico y racémico. Para asegurarse de que no había fraude, Biot insistió en suministrar su propio ácido racémico. Después de haberse evaporado la solución y formado cristales, observó por encima del hombro de Pasteur, mientras el joven químico separaba los menudos cristales en las formas de la "mano derecha" y de la "mano izquierda". Biot insistió en preparar personalmente las dos soluciones y examinarlas a través del polarímetro para ver cómo cada una de ellas hacía virar la luz. Escogió primero la solución "más interesante", escribió Pasteur después: la solución que constituía la "nueva" forma de ácido tartárico no conocida antes.

«Sin necesidad de medida –escribió Pasteur (cito del libro de Dubos)–, Biot reconoció que había una fuerte levorrotación (rotación a la izquierda). Entonces el ilustre anciano, visiblemente emocionado, me tomó de la mano y me dijo: "Hijo mío, he amado la ciencia tan profundamente que esto conmueve mi corazón".»

Éste fue el primer gran experimento de Pasteur, un experimento que estableció sin ninguna duda que podían existir moléculas de formas enantiomorfas, imágenes especulares unas de otras.

El segundo gran descubrimiento de Pasteur en este campo, diez años después, fue el de que cuando una determinada planta de moho se la deja crecer en una solución de ácido racémico, la solución se hace ópticamente activa. Una serie de experimentos demostraron que el moho destruía únicamente las moléculas de cierta "mano", pero dejaba inalteradas las moléculas que eran su imagen especular. Era evidente que algún tipo de asimetría en las sustancias orgánicas del moho hacía que éste actuase únicamente sobre un tipo de molécula del ácido tartárico. En su anterior experimento, fue el propio Pasteur el que separó los dos tipos de moléculas; había ahora un nuevo y original método de hacer lo mismo.

«El organismo viviente asimétrico», escribió Pasteur, «selecciona para nutrirse aquella forma concreta de ácido tartárico que satisface sus necesidades –la forma, sin duda, que de algún modo se adapta a su propia asimetría– y deja por completo intacta, o casi, la forma opuesta. El organismo asimétrico exhibe así una facultad que ninguna sustancia química simétrica, como pueden serlo nuestros agentes oxidantes ordinarios, ni ninguna forma simétrica de energía, como el calor, podrá jamás poseer: la facultad de distinguir entre enantiomorfos. Sólo los agentes asimétricos pueden manifestar una acción selectiva al tratar con enantiomorfos.»

Como Dubos expone claramente en su excelente librito, Pasteur reflexionó profundamente sobre las implicaciones de estos experimentos. Sabía que la mayoría de las sustancias orgánicas que se encuentran en los seres vivos son ópticamente activas. Por el contrario, las soluciones de compuestos procedentes del mundo inanimado eran invariablemente inactivas. Pasteur llegó a la conclusión de que únicamente los seres vivos podían producir un compuesto de moléculas asimétricas que fueran todas "en la misma dirección". Había encontrado en su laboratorio dos métodos para formar tales compuestos, pero ambos métodos implicaban un agente vivo: en un caso un moho, y en el otro caso el agente era el propio Pasteur, que había dividido las moléculas separando los cristales que habían formado.

Pasteur estaba convencido (y tenía razón) de que únicamente en los tejidos vivos se pueden encontrar sustancias asimétricas compuestas precisamente por un tipo de molécula asimétrica. Esta era –creía– la única "línea bien definida de demarcación que se puede

trazar en el presente entre la química *de la materia muerta* y la química *de la materia viva*".

«Fuerzas inanimadas simétricas –escribió Pasteur–, que actúen sobre moléculas o átomos simétricos, no pueden producir asimetría, puesto que la producción simultánea de dos mitades asimétricamente opuestas es equivalente a la producción de un todo simétrico, sea que las dos mitades asimétricas estén en realidad unidas en la misma molécula... o sea, que existan como moléculas separadas, como las levógiras y dextrógiras que forman el ácido racémico. En cualquier caso, la simetría del conjunto queda probada por su inactividad óptica.»

En una conmovedora carta a un amigo, en 1851, Pasteur escribía (cito una vez más el libro de Dubos): «Estoy al borde de los misterios, y el velo que los cubre es cada vez más tenue. La noche me parece demasiado larga.» Con esta última frase Pasteur sólo quería decir que apenas podía soportar la interrupción nocturna de su trabajo; ¡tan ansioso estaba de volver al laboratorio!

Pasteur no tenía modo de conocer la exacta naturaleza geométrica de la asimetría que hacía que una molécula difiriera de su imagen especular; pero no le cabía duda de que tal asimetría existía. «Las estructuras moleculares de los dos ácidos tartáricos son asimétricas –escribió– y, por otra parte, son rigurosamente la misma, con la única diferencia de que muestran asimetría en sentido opuesto. ¿Están los átomos del ácido dextrógiro agrupados en espirales que van hacia la derecha, o situados en los ángulos de un tetraedro irregular, o dispuestos de acuerdo con alguna particular agrupación asimétrica, u otra cosa? No podemos responder a estas preguntas. Pero no se puede dudar de que existe una disposición de los átomos en un orden asimétrico cuya imagen no es superponible. No es menos cierto que los átomos del ácido levógiro forman precisamente la agrupación asimétrica que es la inversa de ésta.»

En el decenio de 1860, algunos químicos sugirieron que la asimetría óptica de los compuestos orgánicos pudiera deberse a que el átomo de carbono era tetraédrico; pero esta idea no fue presentada como teoría sistemática hasta 1874. Biot no vivía ya, y Pasteur contaba 52 años. Como ocurre a menudo en la historia de la ciencia, la teoría correcta fue expuesta al mismo tiempo e independientemente por dos hombres: en este caso, uno era un joven francés, Joseph Achille Le Bel; el otro, un joven holandés, Jacobus Henricus van't Hoff. Los dos sugirieron que el átomo de carbono en un compuesto de carbono está situado en el centro de una estructura tetraédrica,

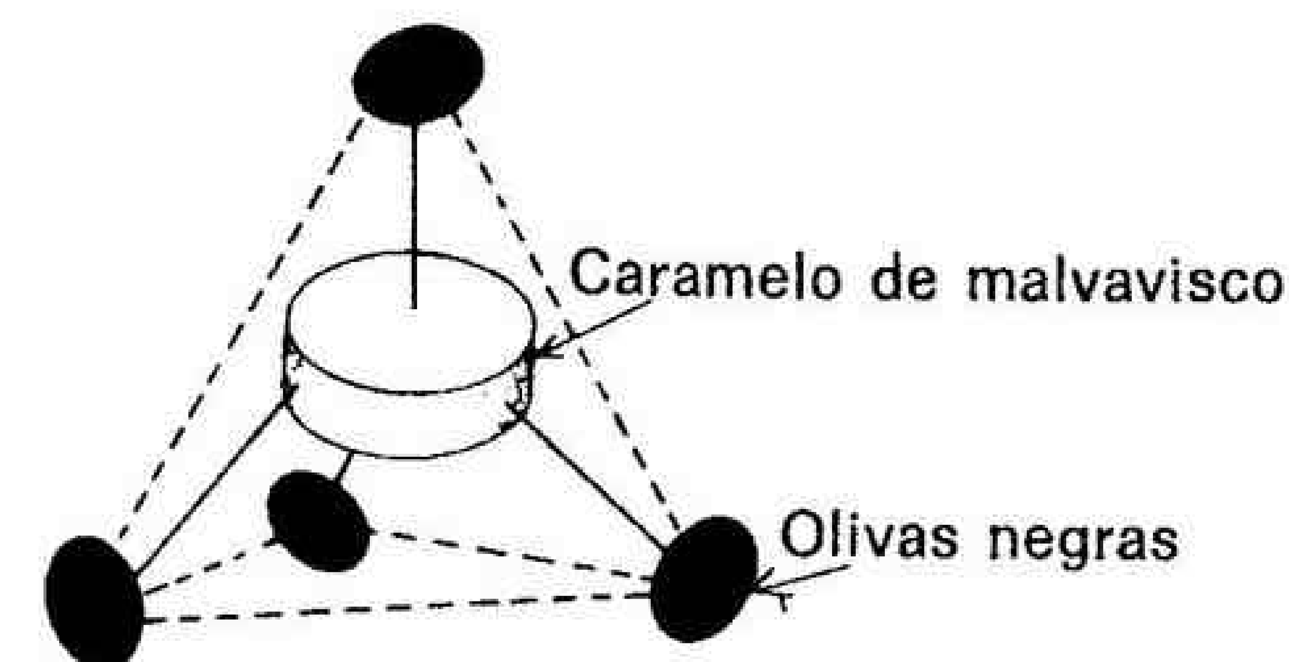


Fig. 33. Un modelo de molécula de metano.

unido por enlaces químicos con otros cuatro átomo situados en los cuatro vértices del tetraedro. El átomo de carbono tiene sitio para ocho electrones en su envoltura exterior, pero sólo contiene cuatro. Así pues, tiene, por así decirlo, cuatro plazas vacantes en las que pueden encajarse electrones procedentes de las envolturas exteriores de otros cuatro átomos. Si no hay dos de estos cuatro átomos agregados que sean iguales –razonaban Le Bel y van't Hoff– la estructura tetraédrica será asimétrica y no superponible a su imagen especular.

Isaac Asimov, en un párrafo sobre el átomo de carbono en el tomo segundo de su *Intelligent Man's Guide to Science* (Basic, 1960), sugiere un modo sencillo de construir un modelo de un compuesto tetraédrico de carbono. Representemos el átomo central de carbono por una pastilla de malvavisco. Con cuatro mondadientes unimos cuatro olivas negras a la pastilla de malvavisco para formar la estructura tetraédrica de la figura 33. Las cuatro olivas negras representan otros cuatro átomos, todos de un mismo elemento. Por ejemplo, si cada oliva negra es un átomo de hidrógeno, tendremos delante un modelo de metano, o gas de los pantanos. La fórmula del metano es CH_4. Esto significa que cuatro átomos de hidrógeno están ligados por enlaces químicos a un átomo de carbono formando una sola molécula de metano. Como se recordará, el átomo de carbono tiene sitio en su envoltura exterior para cuatro electrones más. Cada átomo de hidrógeno tiene un solo electrón, de modo que es fácil para cuatro átomos de hidrógeno unirse a un átomo de carbono. Cuando se combinan hidrógeno y carbono, los compuestos se llaman *hidrocarburos*. La molécula de metano es una de las más sencillas de todas las moléculas de hidrocarburos. En tiempos de Pasteur esta molécula se esquematizaba (como todavía hoy) usando

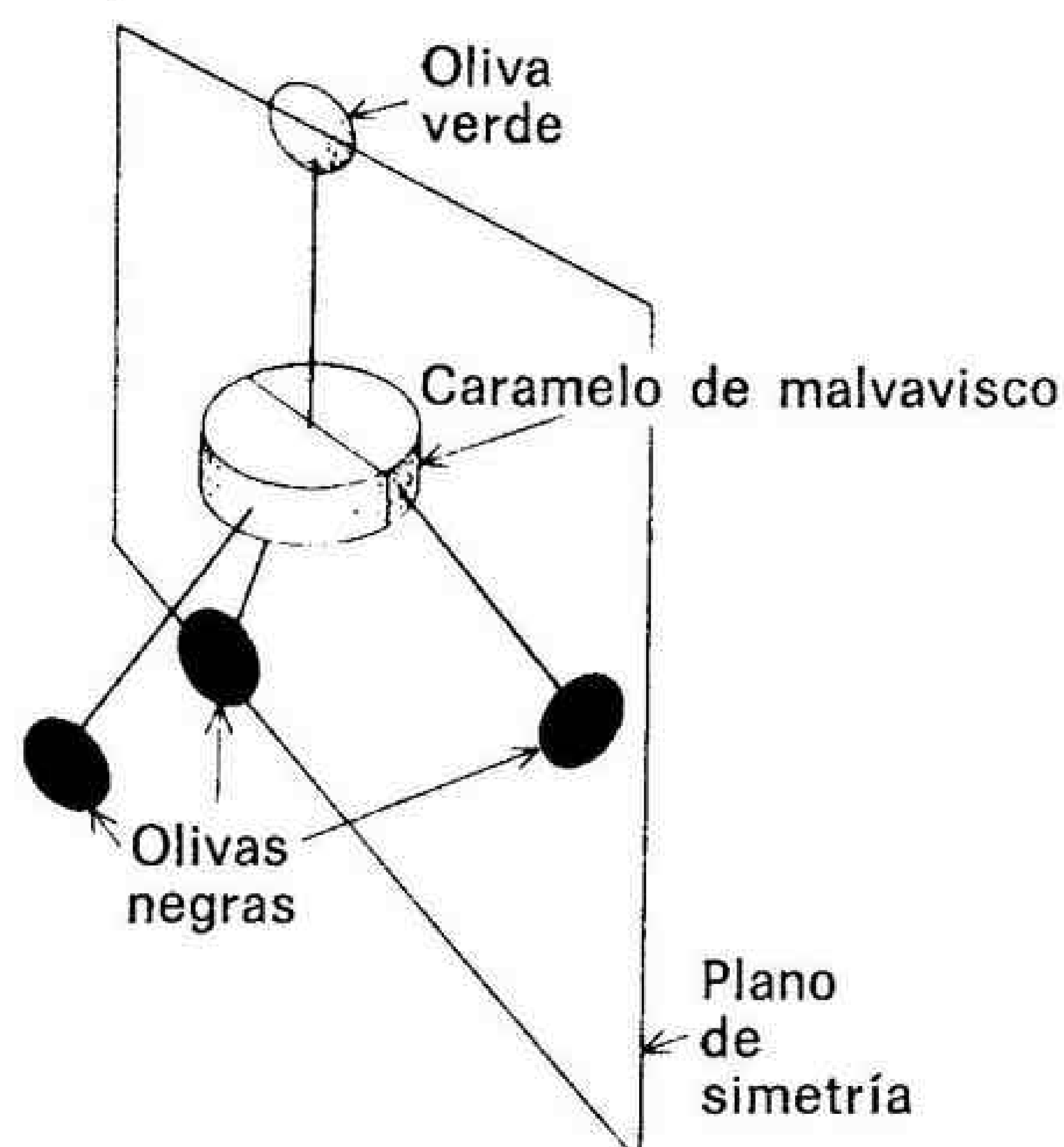
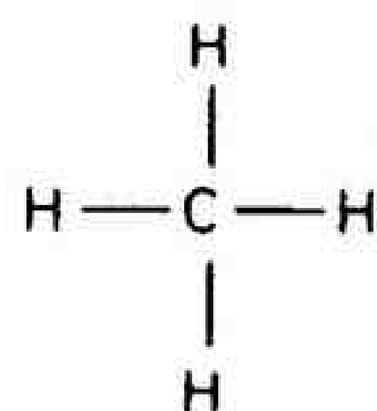


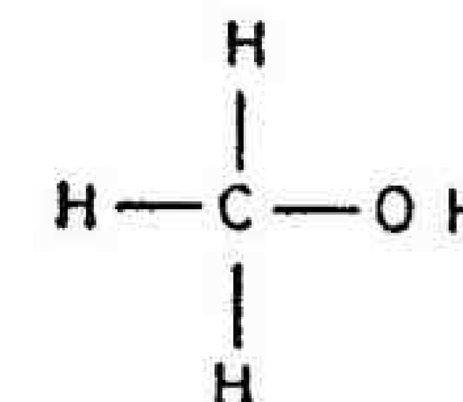
Fig. 34. Un modelo de alcohol de madera, mostrando uno de sus tres planos de simetría.

guiones para representar los enlaces químicos que conectan los cuatro H (átomos de hidrógeno) con el único C (átomo de carbono):



El diagrama está –por supuesto– confinado a un plano. Le Bel y van't Hoff se dijeron: si imaginásemos esta estructura como una configuración estable en el espacio tridimensional, ¿qué clase de estructura sería? El tetraedro, el más sencillo de los cinco sólidos platónicos mencionados en el capítulo anterior, viene inmediatamente a la memoria, porque permite situar cada átomo de hidrógeno a la misma distancia de cualquier otro átomo de hidrógeno. El átomo de carbono (el malvavisco) está en el centro, a igual distancia de todos los átomos de hidrógeno. Esta molécula es claramente simétrica. En efecto, tiene varios planos de simetría derecha-izquierda. Puede ser superpuesta a su imagen especular.

Supongamos ahora que quitamos una de las olivas negras y la sustituimos por una oliva verde. ¿Sigue siendo simétrico el modelo? Sí; hay todavía tres planos de simetría, cada uno de los cuales divide por la mitad la oliva verde. Uno de esos planos se ve en la figura 34. El modelo sigue siendo superponible a su propia imagen especular. El metanol o alcohol de madera, el más sencillo de los alcoholes, es un ejemplo de tal estructura. Su fórmula CH_3OH tiene este diagrama:



Quite otra oliva negra, y reemplácela ahora por una cereza. ¿Ha quedado destruida la simetría del modelo? Al pronto, tal vez usted responda que "sí", pero si lo considera más detenidamente pronto se dará cuenta de que la respuesta es "no". El modelo sigue siendo simétrico.

EJERCICIO 10: *Explique cómo hacer pasar un plano de simetría a través del modelo de la figura 35, lo que demostraría que es superponible a su imagen especular.*

Un ejemplo de este tipo de estructura se encuentra en el alcohol etílico, alcohol de vino, que tiene la fórmula C_2H_5OH. En el dia-

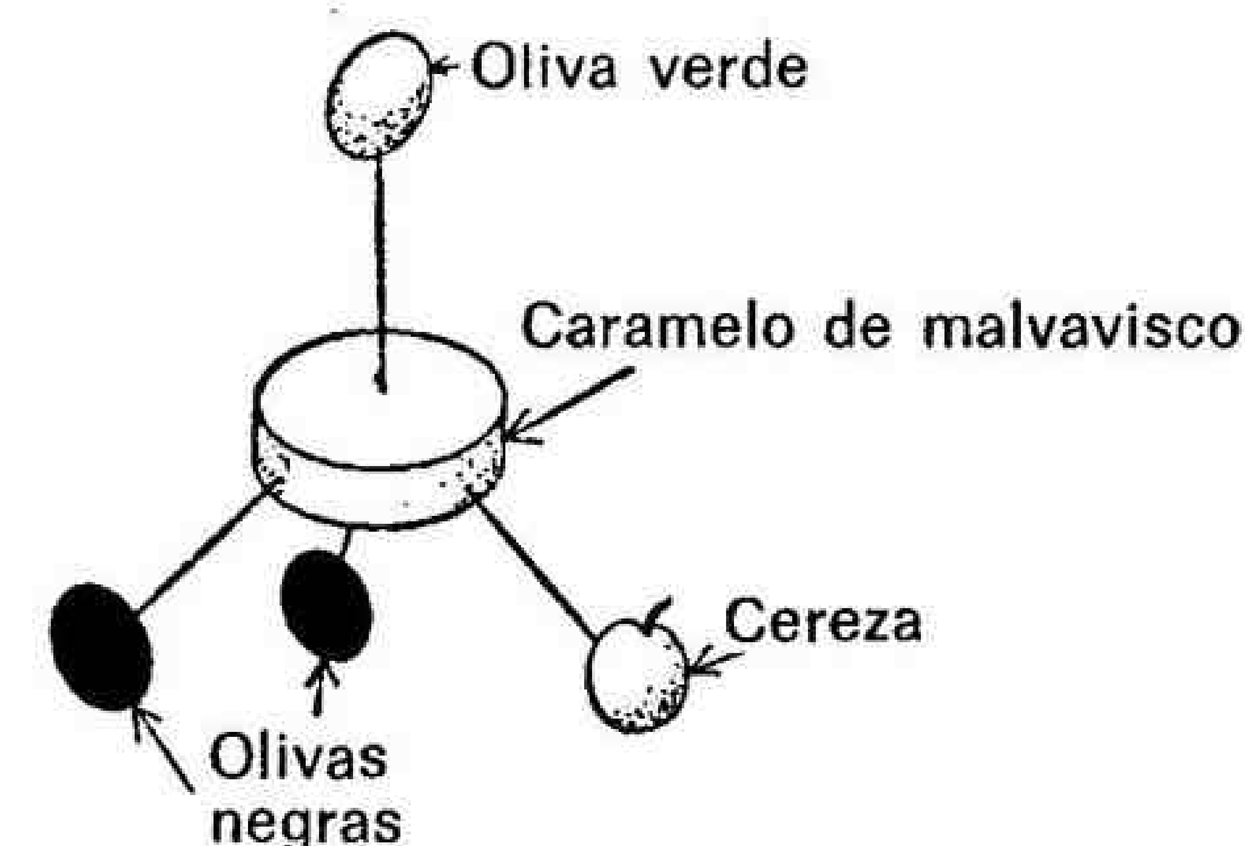
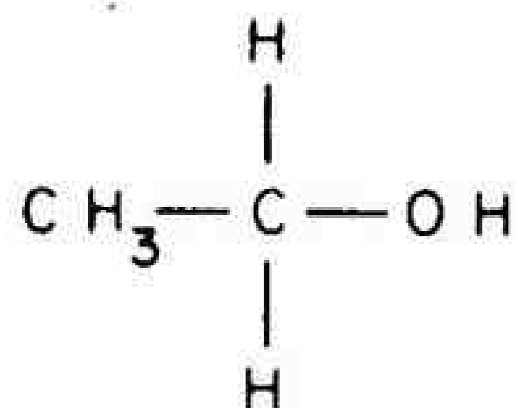


Fig. 35. Un modelo de la molécula de alcohol etílico. ¿Es simétrica?

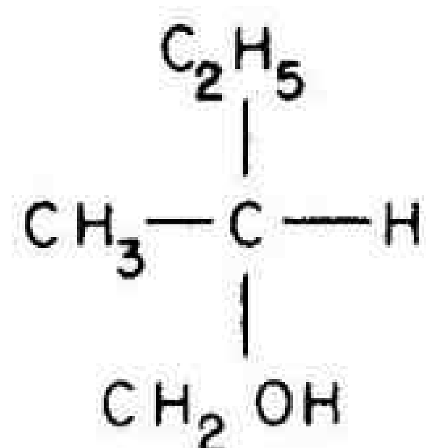
grama verá usted que el átomo de carbono está enlazado con dos átomos de hidrógeno que son, claro está, iguales; los otros dos están unidos con grupos de átomos que no son iguales.

Si al menos dos átomos, o grupos de átomos, enlazados con el átomo central de carbono son iguales, la molécula será simétrica,



pero si usted quita una tercera oliva negra y la sustituye con una cebolleta de cóctel, la simetría queda por fin destruida (fig. 36). Ahora ya no hay ningún plano de simetría. No importa cómo haga usted girar este modelo en el espacio de tres dimensiones, nunca lo hará coincidir con su imagen especular.

Un ejemplo de este tipo de molécula lo tenemos en el alcohol amílico, cuyo diagrama es éste:



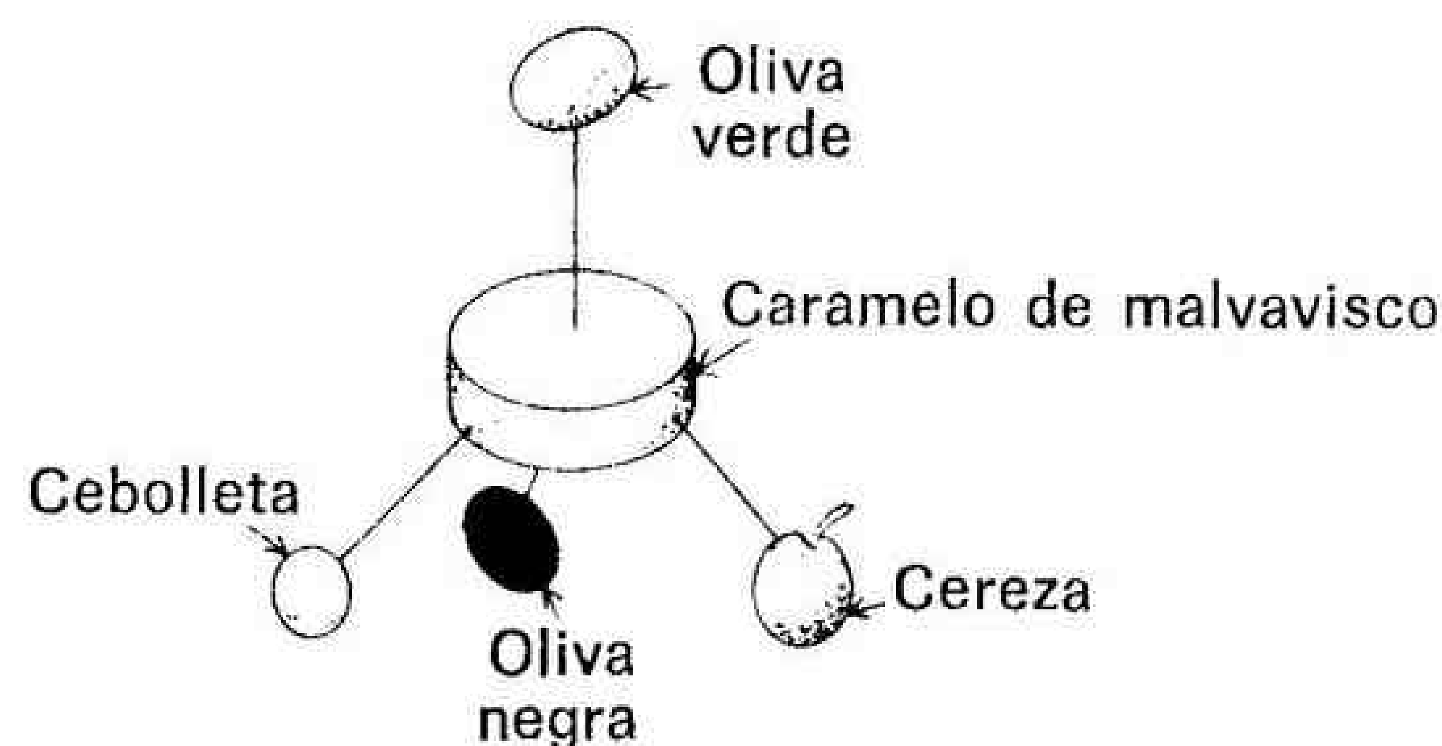


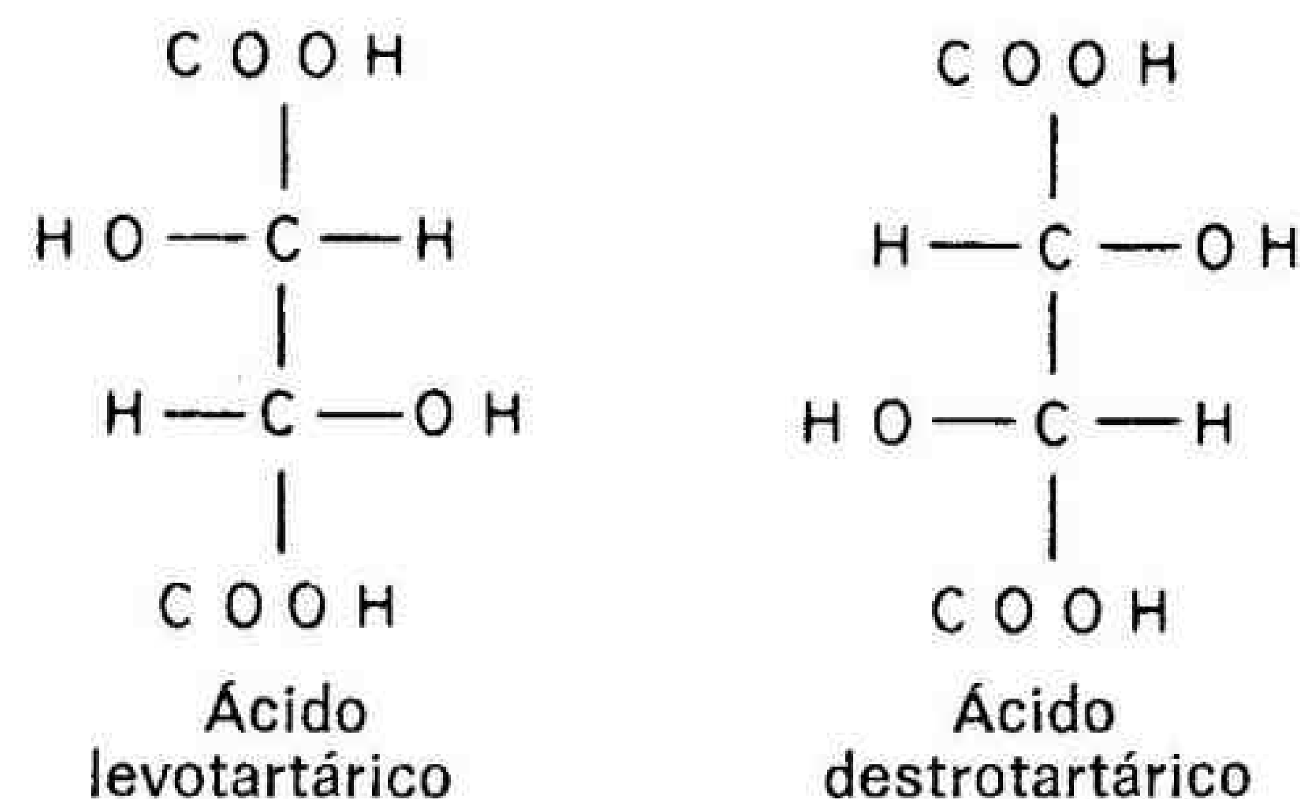
Fig. 36. Modelo de un átomo asimétrico de carbono.

Como se ve, cada una de las cuatro estructuras con que está enlazado el átomo central de carbono es diferente. Siempre que ocurre así, el átomo de carbono se llama *átomo asimétrico de carbono*. Naturalmente, el átomo de carbono mismo no es asimétrico; es asimétrico únicamente en el sentido de que está enlazado con otros cuatro átomos o grupos de átomos de tal manera que resulta una estructura asimétrica tridimensional. Una molécula que contenga uno o más átomos asimétricos de carbono suele ser asimétrica. Las excepciones ocurren cuando átomos asimétricos de "mano" opuesta se equilibran unos con otros, de la misma manera que nuestra oreja izquierda se equilibra con la derecha. Un ejemplo es el cuarto tipo de ácido tartárico, llamado mesotartárico.

Los diagramas de la figura 37 dejan ver claramente cómo el ácido mesotartárico difiere de las otras tres formas. Una molécula tartárica "de la mano derecha" contiene dos átomos asimétricos de carbono, ambos "de la mano derecha". Una molécula tartárica de la "mano" izquierda contiene dos átomos asimétricos de carbono, los dos de la "mano" izquierda. El ácido tartárico racémico es una mezcla de partes iguales de moléculas de la "mano" derecha y de la "mano" izquierda. Se dice que están *compensadas externamente*. Es ópticamente inactivo a causa de que el número de moléculas que hace girar la luz polarizada en una dirección está equilibrado por el número de moléculas que la hacen girar en la otra dirección. El ácido mesotartárico es también inactivo ópticamente, pero por una razón algo diferente: cada una de sus moléculas está compuesta de un átomo de carbono de la "mano" derecha enlazado a uno de la "mano" izquierda. Se dice de tal molécula que está *compensada internamente*. Es bilateralmente simétrica, de la misma manera que la cabeza es simétrica a pesar de la asimetría de las orejas.

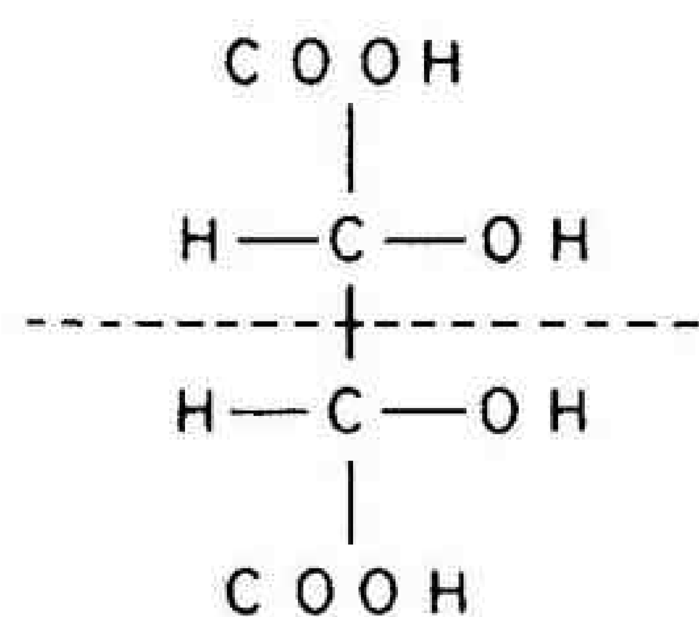
Para resumir: Una molécula puede contener átomos asimétricos y todavía, en conjunto, ser simétrica. Una molécula puede contener átomos no asimétricos y, sin embargo, tener una estructura total asimétrica. Todo compuesto de moléculas asimétricas tiene una forma "a derechas" y una forma "a izquierdas". Algunos de estos compuestos tienen formas racémicas en las cuales las moléculas de una y otra "mano" están mezcladas. En raros casos, las moléculas mezcladas pueden enlazarse para dar lugar a una meso-forma.

Toda molécula asimétrica puede tomar una de las dos formas enantiomorfas. Un compuesto formado por moléculas de una "mano", a causa de la asimetría de su campo electromagnético, hará girar un plano de luz polarizada en una dirección. Un com-

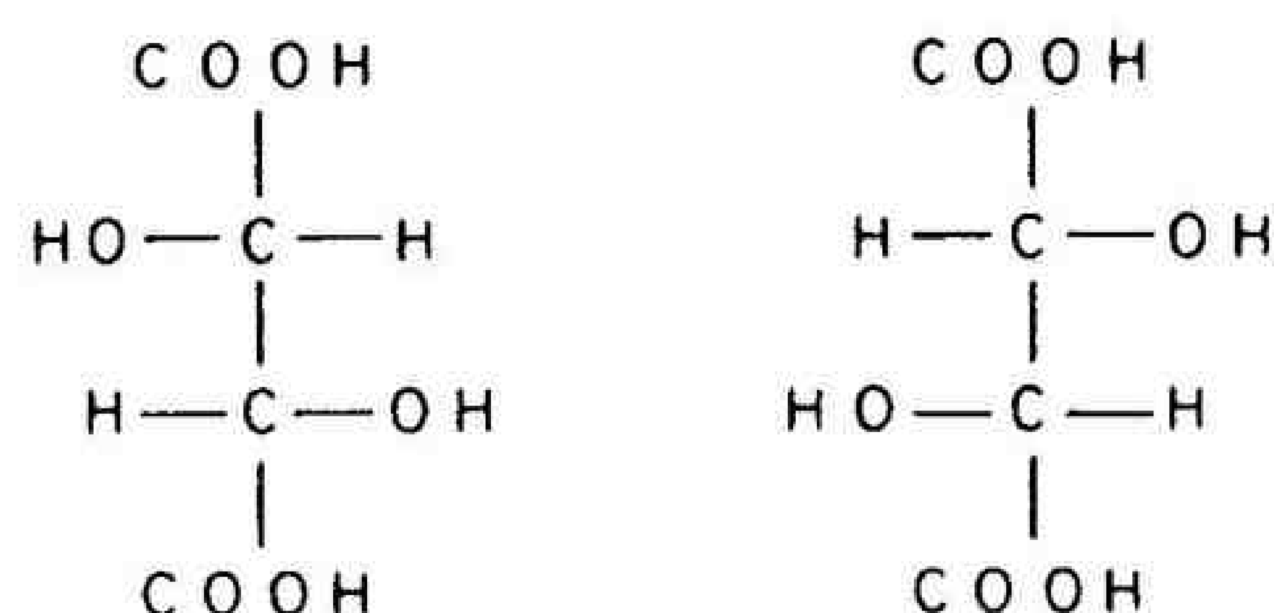


Ácido levotartárico

Ácido destrotartárico



Ácido mesotartárico. La línea de puntos representa el plano de simetría



Ácido racémico tartárico o mezcla igual de moléculas de la mano derecha y de la izquierda

Fig. 37. Cuatro clases de ácido tartárico.

puesto de las mismas moléculas, pero de "mano" opuesta, hará girar la luz polarizada el mismo número de grados, en la dirección contraria. Toda sustancia que haga girar la luz polarizada en el sentido de las manecillas del reloj (cuando usted mira la sustancia situada entre usted y el foco de luz) se dice que es *dextrógira*. Si hace girar la luz polarizada en sentido contrario a las agujas del reloj se dice que es *levógira* (*dexter* y *laevus*, son los nombres latinos de derecha e izquierda). La "mano" de una sustancia activa ópticamente se indica en los prefijos *dextro* o *levo* antepuestos a su nombre o más sencillamente *d* o *l*. Así el ácido tartárico de la "mano" derecha se llama dextrotartárico o *d*-tartárico, y el de la "mano" izquierda se llama levotartárico o *l*-tartárico.

Cuando van't Hoff y Le Bel, independientemente uno de otro, sugirieron una estructura asimétrica tetraédrica como explicación de la actividad óptica, muchos científicos se burlaron de la idea. Uno de los colegas de van't Hoff la rechazó como una "miserable filosofía especulativa". Sin embargo, antes de mucho tiempo, las pruebas que apoyaron la teoría fueron abrumadoras. Hoy sabemos que casi todas las sustancias encontradas en los organismos vivos son compuestos de carbono que poseen una asimetría básica (que los químicos han dado en llamar "quiralidad", término acuñado por Kelvin), debida a la presencia de átomos de carbono asimétricos en el compuesto.

No se debe pensar que dentro del compuesto hay pequeños tetraedros perfectos. El modelo tetraédrico no es más que una manera tosca de describir la estructura de los enlaces químicos, que sólo pueden ser descritos con precisión por las ecuaciones matemáticas de la moderna teoría química. Para nuestros propósitos, sin embargo, es lo bastante exacto. Algunos de los fascinantes detalles e implicaciones del átomo asimétrico de carbono constituirán el contenido del capítulo siguiente.

13. Carbono

Los bioquímicos (químicos que estudian los procesos de los seres vivos) encuentran difícil imaginar cualquier género de vida –excepto posiblemente una forma perezosa, inferior– que no requiera decenas de miles de diferentes géneros de tejido, cada uno de ellos destinado a una tarea sumamente especializada. Pensemos solamente en la complejidad del ojo, que no es sino uno de los muchos órganos del cuerpo. El cuerpo ha de sintetizar compuestos especiales para suministrarlos a cada parte componente: el cristalino o lente, los músculos que cambian la forma del cristalino, los músculos que abren y cierran la pupila, el iris, las capas de la córnea, los líquidos que llenan las cámaras, la retina, la coroides, la esclerótica, el nervio óptico, los vasos sanguíneos. Cada parte requiere sustancias enormemente complicadas que tengan las propiedades necesarias para hacer precisamente lo que deben hacer.

Miles de millones de tales tejidos especializados son esenciales para las formas vivientes en la Tierra. Es difícil imaginar cómo podría la evolución haber desarrollado esos tejidos sin auxilio del carbono, elemento que sobrepasa a todos los demás en su capacidad para formar una variedad virtualmente ilimitada de compuestos, cada uno con su propia y única serie de propiedades. Hay más del doble de compuestos de carbono conocidos que todos los demás compuestos conocidos juntos. Los tejidos de toda cosa viviente sobre el haz de la Tierra, desde un virus submicroscópico a un elefante, están hechos de sustancias que contienen carbono. Algunos bioquímicos van más lejos, y llegan a definir la vida como una de las complejas propiedades de los compuestos del carbono.

¿Cómo se las arregla el carbono para ser un elemento tan versátil, tan adaptable? La respuesta es que el carbono es un gran "en-

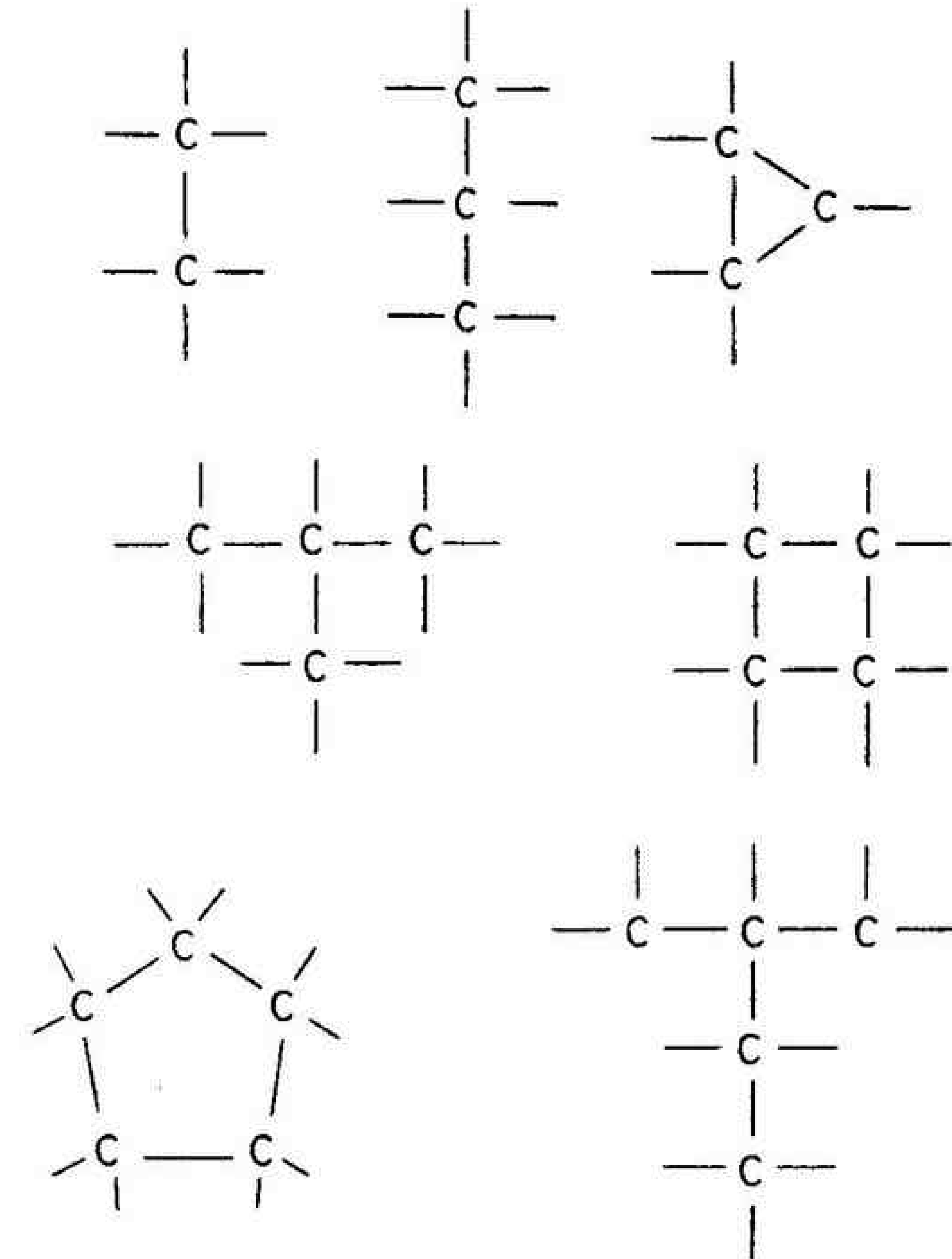


Fig. 38. Ejemplo de modos simples en que pueden unirse los átomos de carbono.

samblador". A causa de que la envoltura exterior tiene sitio para otros cuatro electrones más, puede enlazarse con otros átomos de carbono para formar una cadena de longitud indefinida, y cada eslabón en la cadena (cada átomo de carbono) tendrá dos sitios, por así decir, en los cuales otros átomos o grupos de átomos pueden serle agregados, como colgantes a un brazalete. La cadena puede ser sencilla, con dos extremos, como un trozo de cuerda. Puede bifurcarse, como una carretera con ramales, y puede tener muchos extremos sueltos. Puede juntar los extremos para formar lazos o anillos. Anillos y cadenas pueden estar combinados en la misma molécula. La figura 38 muestra únicamente unos cuantos de los dibujos más sencillos que los átomos de carbono pueden formar al enlazarse de modos diferentes. Cada guión representa un enlace

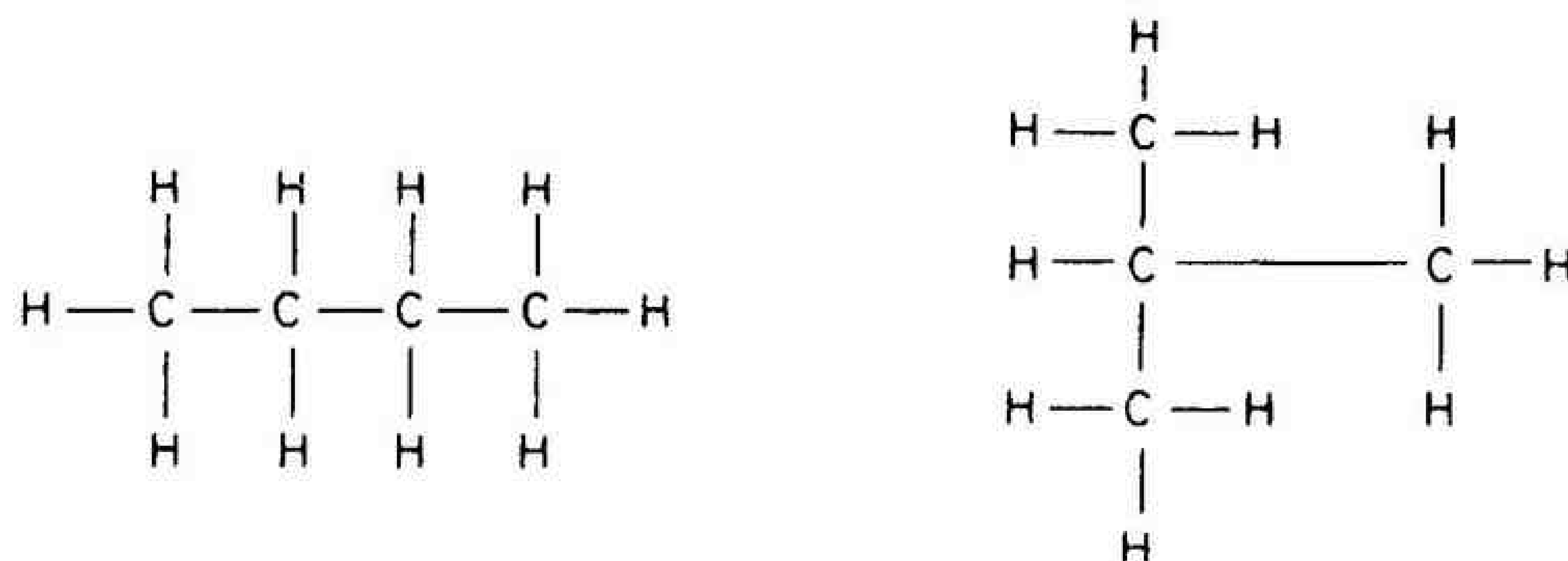


Fig. 39. Butano (a la izquierda) e Isobutano (a la derecha) tienen los mismos átomos, pero diferentemente unidos.

químico al cual se puede agregar otro átomo o grupo de átomos para formar lo que los químicos llaman "cadenas laterales".

Cuando dos moléculas son exactamente iguales en el número y género de átomos que contienen, pero difieren en el modo de unirse los átomos, se dice que son *isómeros* (palabra que en griego significa "de partes iguales"). Imagínese cada molécula como una serie de esferas de diferentes colores (con todos los átomos del mismo elemento de igual color), unidas entre sí por cintas elásticas. Las dos moléculas tienen exactamente el mismo número de esferillas de cada color, pero enlazadas de modo diferente. A causa de esta diferencia topológica en la malla por la cual están conectadas, los dos isómeros pueden diferir en peso específico, punto de ebullición y toda clase de otras importantes propiedades. Un sencillo ejemplo de isomerismo nos lo ofrecen las dos maneras topológicamente distintas en que cuatro átomos de carbono y diez átomos de hidrógeno pueden estar enlazados. Conectados como en la figura 39, a la izquierda, el compuesto es *butano;* conectados como se ve en la figura 39, a la derecha, es *isobutano.*

¿Es posible que dos moléculas sean exactamente iguales no sólo en el número y género de sus átomos, sino también en la manera como sus átomos están enlazados y, sin embargo, ser "diferentes"? Sí; la pregunta fue contestada en el capítulo anterior. Una estructura puede ser la imagen especular de la otra. Esta forma de isomerismo se llama *estereoisomerismo.* (El prefijo *stereo* –de la palabra griega "sólido"–, se refiere al hecho de que el estereoisomerismo comporta estructuras que deben ser consideradas como tridimensionales, lo mismo que los modelos tetraédricos de las moléculas de

carbono estudiadas en el capítulo precedente.) Siempre que la estructura total de una molécula es asimétrica, esta molécula tiene una forma que es su imagen especular. Además, partes de la molécula pueden ser asimétricas y cada parte puede tomar una u otra de las dos formas de imagen especular. Por ejemplo, si un compuesto de carbono contiene cinco átomos asimétricos de carbono, cada átomo puede tomar formas de la "mano" derecha o de la "mano" izquierda, haciendo de este modo posibles un gran número de estereoisómeros. No es raro que una molécula gigante de carbono tenga millones de isómeros, de los cuales decenas de millares son estereoisómeros. El estereoisomerismo es un tema técnico, complicado, pero a nosotros sólo nos interesa un sencillo hecho: toda molécula con una estructura asimétrica tiene un estereoisómero que es su duplicado exacto en todos los aspectos, excepto en que es de "mano" opuesta.

Cuando un compuesto asimétrico se encuentra en la naturaleza sin ser resultado de un proceso vivo, siempre se le encuentra en forma racémica; es decir, que es una mezcla igual de moléculas de "mano" derecha y de "mano" izquierda. La razón es fácil de comprender. Las fuerzas de la naturaleza –gravedad, inercia, etc.– no tienen preferencia por la derecha o la izquierda. Mientras el compuesto se está formando, las leyes de probabilidad dictan que las moléculas de cada "mano" se formen en cantidades iguales. Incluso en el laboratorio, si los estereoisómeros son sintetizados sin aplicar algún tipo de asimetría, el resultado será una mezcla racémica, simétrica, que no hace virar el plano de la luz polarizada.

Imagínese que tiene ante usted una caja conteniendo miles de letras de sopa, todas ellas con la forma de la letra R. A causa de que son formas sólidas en el espacio tridimensional, no letras impresas en un plano, cada R tiene un plano de simetría y, por tanto, es simétrica. Supongamos, ahora, que usted vacía todas las letras R sobre una mesa, las extiende con las manos hasta que todas estén tumbadas y después las riega con pintura roja. Cada letra, automáticamente, se convierte en una figura asimétrica tan pronto como una de sus caras queda pintada de rojo. A causa de que aproximadamente un mismo número de letras habrá caído con el lado derecho o con el lado izquierdo hacia arriba, habrá tantas letras pintadas de rojo por su lado derecho como por el izquierdo. Resultado: una mezcla igual de letras de la "mano" izquierda y de la "mano" derecha. Algo semejante ocurre cuando los estereoisómeros se forman,

sea en la naturaleza o en el laboratorio, por algún procedimiento simétrico que no favorece una "mano" sobre otra.

La aplicación de polarización, con el propósito de sintetizar un estereoisómero de una "mano" determinada puede ser realizada de muchas maneras diferentes. Hemos visto en el capítulo anterior cómo Pasteur sintetizaba los dos ácidos tartáricos de la "mano" derecha y de la izquierda dividiendo los cristales de una mezcla racémica en grupos de la "mano" derecha y de la izquierda. En este caso fue el propio sentido de Pasteur de la derecha y de la izquierda el que aplicó la asimetría. Nosotros podemos hacer esencialmente la misma cosa con nuestra mezcla "racémica" de letras de las dos "manos". Simplemente, examinaremos las letras una a una. Si una R es roja por el lado izquierdo, la echamos a una caja; si es roja por el derecho la llevamos a otra. Pasteur también encontró modos de sintetizar estereoisómeros de una "mano" explotando los hábitos asimétricos de otros seres vivos como bacterias y mohos. Lo mismo podría hacerse con nuestras letras si encontrásemos algún tipo de organismos que atacase y destruyera únicamente las letras de la "mano" derecha. Quedaría, por supuesto, una colección pura de letras de la "mano" izquierda.

Un tercer método de sintetizar estereoisómeros de una mano, descubierto también por Pasteur, se vale de un compuesto asimétrico que ha sido previamente sintetizado o tomado de un organismo viviente. Una mezcla racémica A se combina, digamos, con un compuesto B de la "mano" derecha. Los dos compuestos resultantes no son enantiomorfos, a causa de que uno es una combinación de dos sustancias de la "mano" derecha y el otro de sustancias de "mano" opuesta. Como no son enantiomorfos, pueden diferir en algunas propiedades químicas, como la solubilidad, que permite separar uno y dejar el otro. El paso final, al separar B de A, deja un A puro de una sola "mano".

Una tosca analogía sería extender la mezcla racémica de las letras R sobre la tabla de una mesa perforada con miles de pequeños agujeros; cada uno del tamaño y figura de una R no invertida cuando se mira desde arriba. Todas las letras yacen de plano, con el lado rojo hacia arriba; la mitad de ellas son R, la mitad son Я. Al revolver las letras por la mesa, cuidando de que ninguna se invierta, únicamente las R caerán a través de los agujeros. Sobre la mesa quedará una mezcla en que predominarán las Я. Aquí la preferencia derecha-izquierda está sustituida no por el proceso de separación, sino por la estructura asimétrica de la tabla de la mesa. La

mesa simboliza un compuesto asimétrico. En las reacciones químicas puede imprimir su asimetría, por así decirlo, a otros compuestos que son mezclas racémicas de formas derechas e izquierdas. El nuevo compuesto asimétrico puede a su vez imprimir *su* asimetría a otras mezclas racémicas, y de esta manera la cantidad total de moléculas asimétricas aumenta constantemente. Es importante comprenderlo, porque, como veremos después, es probable que fuera precisamente de este modo como unos cuantos compuestos asimétricos, en la temprana historia de la Tierra, fueron capaces de imprimir su "mano" a casi todas las moléculas de los seres que viven hoy.

Para resumir: Algún tipo de asimetría derecha-izquierda (sea que se origine por el propio sentido de derecha e izquierda del químico o en las sustancias, fuerzas u organismos vivientes que desempeñan un papel en los procedimientos de laboratorio) ha de intervenir en algún punto de todo método para sintetizar estereoisómeros de una "mano".

Casi todo compuesto de carbono encontrado en seres vivos es un estereoisómero de una sola "mano", que hace virar la luz polarizada en una u otra dirección[1]. Una clase familiar de tales compuestos orgánicos activos son los hidrocarburos llamados azúcares. La mayoría de ellos son de la "mano" derecha. Por ejemplo, el azúcar corriente de mesa o *sacarosa* hace girar la luz polarizada hacia la derecha. Así lo hace el azúcar de uva, una forma de *glucosa*. El azúcar de uva es llamado a veces *dextrosa*, a causa de que es de la "mano" derecha. La *fructosa* o azúcar de fruta, por el contrario, hace virar la luz polarizada en la otra dirección, y por esta razón se la suele llamar *levulosa*. Ésta tiene exactamente los mismos átomos en su molécula que el azúcar de uva, pero el modo en que están unidos da un gusto más dulce que la dextrosa. En 1981, Biospherics, Inc., una firma de Rockville, Maryland, anunció que había patentado un proceso para la fabricación de azúcar "de la mano izquierda", que pensaba comercializar, si era aprobada por los organismos oficiales, como endulzante artificial. Este azúcar tiene el mismo sabor que el azúcar ordinario, no engorda, no es perjudicial para los diabéticos, se mantiene fresco debido a que los microorganismos no la atacan y, por esa misma razón, no provoca caries dental.

De todos los estereoisómeros de carbono, los más complicados, así como los más numerosos, son las *proteínas*. Todos los organismos vivos en la Tierra contienen algún tipo de proteína. El cuerpo humano se cree que contiene unas 100.000 clases diferentes de proteínas. Una sola célula del cuerpo humano puede contener miles

de enzimas diferentes (ayudas necesarias para las mil diferentes reacciones químicas), y toda enzima es una proteína. La mayoría de las hormonas (reguladoras del crecimiento y la actividad) son proteínas. Ni una sola parte del cuerpo, incluyendo huesos, sangre, músculos, tendones, piel, cabello o uñas, deja de tener alguna clase de proteína en su estructura. Ya he dicho antes que muchos bioquímicos piensan que la vida no es posible sin la versatilidad del carbono. Algunos bioquímicos piensan que no es posible sin la versatilidad de las proteínas.

Las moléculas de proteína están compuestas por átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y, por lo general, aunque no siempre, azufre. Son las mayores y más complicadas de todas las moléculas. Una molécula de proteína relativamente sencilla contiene aproximadamente un millar de átomos. Las moléculas gigantes de proteína contienen cientos de miles de átomos, y las moléculas supergigantes de proteína tienen más de un millón. Cada molécula está compuesta de subunidades llamadas *aminoácidos,* unidos como los eslabones de una cadena. Las moléculas gigantes de esta clase, compuestas de unidades que por sí solas pueden considerarse moléculas, son conocidas como *polímeros.*

Hay unas veinte variedades diferentes de aminoácidos, todas salvo una, la glicina, con una estructura asimétrica que puede tomar una forma derecha o izquierda. Cuando un aminoácido es sintetizado en el laboratorio, es una mezcla racémica de ambos tipos de "mano", pero en las proteínas de los seres vivos (salvo unas cuantas raras excepciones) es siempre de la "mano" izquierda. Esto no significa necesariamente que harán virar el plano de la luz polarizada en sentido contrario a las manecillas del reloj. Las cadenas laterales de un aminoácido también influyen en la manera en que hacen virar la luz polarizada. Todos los aminoácidos encontrados en los seres vivos son de la "mano" izquierda en lo que respecta a la disposición de los átomos alrededor del átomo de carbono, pero algunos, a causa de la estructura de las cadenas laterales (cadenas de átomos enlazadas a los átomos de carbono), hacen virar el plano de la luz polarizada en el sentido de las agujas del reloj.

Además de la "mano" izquierda de todas sus subunidades de aminoácidos, toda molécula de proteína encontrada en la naturaleza tiene una "columna vertebral" que se enrosca formando una hélice. La columna vertebral, llamada a veces *cadena polipéptida,* es simplemente la cadena básica de los aminoácidos. Todo aminoácido tiene un extremo *amino* y un extremo *ácido.* Cuando los extremos

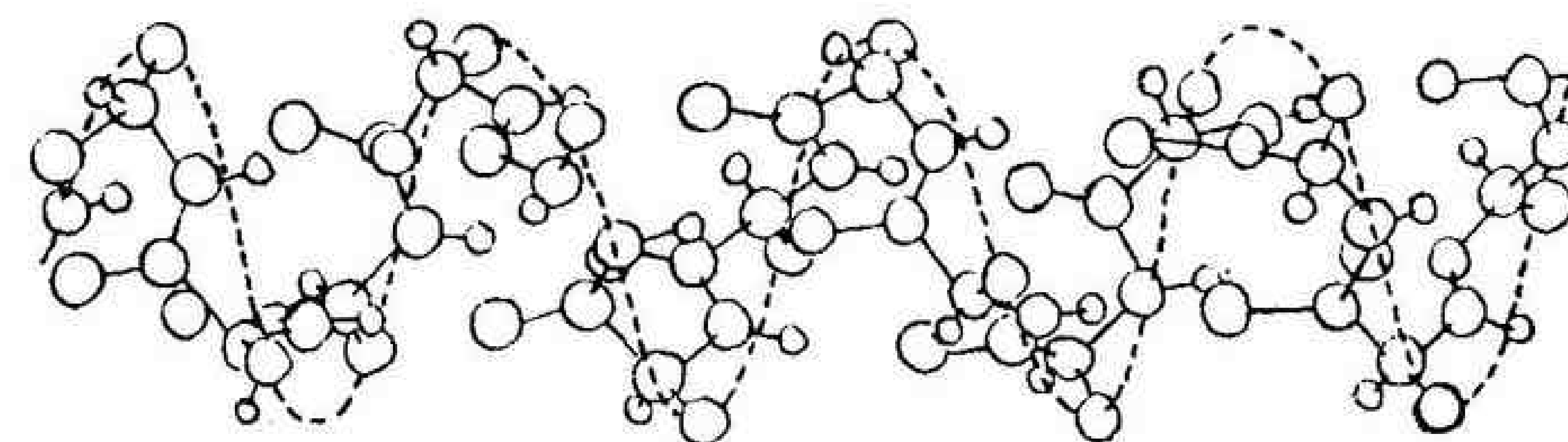


Fig. 40. Modelo de cadena polipéptida mostrando la estructura helicoidal de su "espinazo".

opuestos se unen, se separa de ellos una molécula de agua, por extracción de un átomo de hidrógeno del extremo amino y átomos de oxígeno e hidrógeno de su extremo ácido. Las fuerzas eléctricas sueldan juntos los extremos, en lo que se llama un *eslabón péptido.* Cada aminoácido "a izquierdas" aporta la misma cantidad de torsión a la columna vertebral de la proteína, al igual modo que cada peldaño asimétrico en una escalera de caracol aporta la misma torsión a la escalera. Como resultado, el espinazo forma una hélice del tipo que se ve en la figura 40. Se la llama *hélice alfa.* Linus Pauling y Robert B. Corey, bioquímicos del Instituto de Tecnología de California, fueron los primeros en descubrir y definir esta estructura helicoidal. Desde su descubrimiento en los primeros años cincuenta, la hélice alfa ha sido encontrada en tantas proteínas que la mayoría de los químicos creen hoy que es característica de todas las moléculas gigantes de proteína.

¿Debe ser llamada la hélice alfa *dextrorsum* o *sinistrorsum?* Si usted mira a uno cualquiera de los extremos de esa hélice, la verá enrollándose hacia usted en dirección contraria a las agujas del reloj, o sea hacia la izquierda. Por esta razón, puede ser llamada hélice levotrorsa, "a izquierdas", y de hecho así es llamada por algunos bioquímicos cuando describen una hélice en la naturaleza, tal como la hélice de una planta trepadora. (En el capítulo 7 hemos discutido brevemente esta confusión de terminología respecto a las plantas ensortijadas.) Por otra parte, éste es el tipo de hélice que se encuentra en los tornillos corrientes, comúnmente llamados tornillos dextrorsos. Además, en las estructuras cristalinas, tales como el cuarzo y el cinabrio, este tipo de hélice hará virar el plano de luz polarizada a la derecha, en el sentido de las manecillas del reloj. Por esta razón, los bioquímicos hablan de la hélice alfa como dextrorsa. Es confuso –se debe admitir– decir que aminoácidos a izquierdas hacen a

una molécula de proteína enrollarse en una hélice dextrorsa. Sin embargo, todo ello es una trivial cuestión de palabras, y el origen de la confusión es fácil de comprender. El punto importante es que casi todas las proteínas encontradas en los seres vivientes se cree ahora que tienen un espinazo helicoidal de la misma torsión que un sacacorchos que gira a la derecha.

En muchas estructuras del cuerpo la hélice alfa produce tejidos fibrosos orgánicos que se enrollan también hacia la derecha, produciendo lo que se llama "bobinas enrolladas". Fibras colágenas, por ejemplo, que se encuentran en los tendones y otras partes del cuerpo, se cree ahora que tienen una molécula compuesta de tres hélices alfa enrolladas juntas para formar una triple hélice dextrorsa. Diez de estas hélices triples se enrollan juntas para formar una hélice todavía mayor. Las "bobinas enrolladas" continúan repitiéndose a niveles mayores hasta que se produce una fibra helicoidal bastante grande para ser vista incluso con un microscopio corriente. Otros ejemplos de bobinas enrolladas dextrorsas se encuentran en las fibras del pelo, lana y cuerno, y en la estructura de los flagelos de las bacterias (un apéndice en forma de látigo que impele a una bacteria a través de un líquido). En el capítulo siguiente veremos que también una hélice dextrorsa se encuentra en la estructura de los ácidos nucleicos, compuestos de carbono aún más esenciales para la vida que las proteínas.

El número de moléculas posibles de proteínas, sin ser dos iguales, es casi infinito. Igual que es infinito el número de palabras diferentes que pueden formarse con las letras de nuestro alfabeto. Esto significa, naturalmente, que no hay límite en el número de letras que puede contener una simple palabra y todavía ser llamada "palabra". Cuando se considera el hecho de que el espinazo de una molécula de proteína puede contener un millar o más de subunidades de aminoácidos, y cada unidad puede ser una de veinte variedades diferentes, nos damos cuenta de que las posibilidades para diferentes compuestos superan todo lo imaginable. Naturalmente es justo esta ilimitada variedad lo que hace a las proteínas materiales tan eficaces para la construcción evolutiva de máquinas tan complicadas como los animales –máquinas en las que miles de tejidos especializados tienen que realizar miles de tareas especializadas.

Como cabría esperar, las formas a derechas y a izquierdas de todo compuesto orgánico son exactamente iguales en todas sus propiedades químicas, excepto en las que comportan una diferencia de derecha e izquierda. Tienen el mismo peso específico, se funden

y se congelan a la misma temperatura, etc. Esto es lógico, porque *son* la misma sustancia y porque las fuerzas que actúan sobre ellas (calor, gravedad, etc.) no muestran preferencias por la derecha o la izquierda. Desde luego la asimetría de tales compuestos se revela de muchas maneras. Hará virar un plano de luz polarizada, y puede hacer que el compuesto forme cristales en una determinada dirección. Y producen efectos específicos cuando la sustancia es ingerida por un animal o inyectada en su torrente sanguíneo. Dado que un cuerpo animal está hecho en su mayor parte de compuestos asimétricos, es fácil comprender porqué estereoisómeros de "mano" opuesta producen efectos diferentes en el animal. El Blanco Caballero de *Through the Looking-Glass* (*A través del espejo*), de Lewis Carroll, canta una canción en la que se leen los versos siguientes:

> Y ahora si alguna vez por casualidad meto
> mis dedos en pegamento
> o insensatamente fuerzo el pie derecho
> en el zapato izquierdo...

Los dos últimos versos describen una situación semejante a lo que ocurre cuando reaccionan los compuestos asimétricos. Es fácil meter un pie en un zapato "de la misma mano", difícil entrarlo en un zapato "de la mano contraria". Por la misma razón, suele haber acusadas diferencias en el gusto y el olor de estereoisómeros de manos contrarias. Las terminaciones de los nervios que inician el proceso de gustar y oler[2] están compuestas de sustancias asimétricas que reaccionan de modo diferente cuando entran en contacto con ellas sustancias de la "mano" derecha o de la "mano" izquierda. Si una sustancia asimétrica es ingerida o inyectada en el torrente sanguíneo, también se pone en contacto con compuestos asimétricos del organismo. A veces un estereoisómero de una "mano" es digerido y utilizado por el organismo mientras su gemelo, que es su imagen especular, es sencillamente excretado. En otros casos, ambas formas del estereoisómero son digeridas y utilizadas de la misma manera por el organismo, pero el ritmo de digestión es más lento para una forma que para la otra.

Todavía en otros casos el organismo acepta las dos formas, pero reacciona de modo diferente a cada una. Los cigarrillos, por ejemplo, contienen levonicotina, un compuesto asimétrico de carbono de la familia de los alcaloides. (En este sentido podemos decir que nuestros cigarrillos cilíndricos ¡son todos de la "mano" izquier-

da!) La levonicotina se encuentra en todas las plantas de tabaco. Pero hay una forma de nicotina de la "mano" derecha, la dextronicotina, que *nunca* se encuentra en las plantas de tabaco. Ha sido sintetizada y se ha descubierto que es mucho menos tóxica que la levonicotina. La levohiosciamina dilata fuertemente la pupila de los ojos; la dextrohiosciamina sólo tiene un débil efecto. La levoadrenalina es dos veces más fuerte que su imagen especular en su capacidad de constreñir los vasos sanguíneos. La forma especular de la vitamina C apenas tiene efecto sobre el organismo. La tiroxina, la hormona tiroidea, se da en ocasiones a los enfermos del corazón para rebajar la cantidad de colesterol en su sangre. (El colesterol es una sustancia grasa que desempeña un papel importante en el bloqueo de las arterias, causando ataques cardiacos.) La tiroxina es un aminoácido asimétrico. En la forma natural acelera las reacciones del organismo, produciendo a menudo nerviosismo y pérdida de peso. De una tiroxina sintética, imagen especular de la tiroxina natural, se dice que reduce el colesterol eficazmente, sin indeseables efectos colaterales.

De los millones de compuestos de carbono asimétricos que se encuentran en los seres vivos, casi todos se presentan solamente en una de las dos formas especulares. (Unos cuantos se presentan en ambas formas, pero nunca como compuestos separados en las mismas especies.) Los químicos han sintetizado solamente un pequeño número de estereoisómeros, imagen especular de los naturales que se dan en los seres vivos. A causa de que la mayoría de las sustancias orgánicas sólo se pueden obtener en una de sus dos posibles formas, se conoce muy poco sobre la manera en que el cuerpo humano (u otro organismo cualquiera) reaccionaría a la *otra* forma de la sustancia.

Antes de que Alicia pasara a través del espejo al absurdo mundo de detrás del cristal, dijo a su gatita: "¿Te gustaría, Kitty, vivir en la Casa del Espejo? Quisiera saber si allí te darían leche. Acaso la leche de la Casa del Espejo no es buena para beber..." Lewis Carroll apenas podría darse cuenta de cuán profunda era la cuestión que suscitaba Alicia. Es verdad que el agua, que constituye el 85 por 100 de la leche de vaca, tiene una molécula simétrica que no es afectada por su reflexión en el espejo. Pero la leche contiene también una porción de compuestos asimétricos de carbono, tales como la grasa, la lactosa (un azúcar que sólo se encuentra en la leche) y varios tipos de proteínas. Nadie sabe cómo la imagen especular de esta mezcla afectaría a un gato o a un niño que la bebiera, de modo

que nadie sabe realmente si la leche de la Casa del Espejo es buena para beber o no. Lo probable es que no lo sea. Claro es que un gato de la Casa del Espejo la encontraría tan sabrosa y nutritiva como la leche no reflejada es para un gato no reflejado.

William H. Auden, un gran admirador de los libros de Alicia, suscita una cuestión semejante en su poema *The Age of Anxiety* (La edad de la angustia). Un irlandés diestro, sentado en un bar de Nueva York, al contemplar su imagen en el espejo dice:

> Mi dulce, mi doble, mi querida imagen
> ...¿Qué gusto tiene
> este licor que levantas con tu mano izquierda..?

El licor contiene alcohol etílico, que, como hemos visto en el capítulo anterior, tiene una molécula simétrica. Como el agua de la leche, tampoco es afectado por la inversión especular. Pero también contiene compuestos de carbono llamados *ésteres* que le dan su sabor, y los ésteres son asimétricos. Nadie sabe realmente qué sabor tendría el licor del espejo, pero se puede apostar que no sería el mismo sabor que el del licor corriente, a menos, naturalmente, que fuese paladeado por un irlandés reflejado en el espejo.

Fuera de los seres vivos, los compuestos que se encuentran en la naturaleza o bien son simétricos en el modo en que sus átomos están unidos, o bien, si son asimétricos, las formas de la mano derecha y las de la izquierda se encuentran en igual cantidad. Dentro de los seres vivientes ocurre lo contrario. Nuestros cuerpos están saturados con la asimetría del carbono, la mayoría de la variedad "a izquierdas". Si invertimos en el espejo las moléculas y la estructura cristalina del oro, la estructura sigue siendo exactamente la misma que antes. Reflejemos un vaso de leche o un trago de whisky, y *no* será el mismo. Las estructuras moleculares de ciertas sustancias que hay en la leche o el licor no son superponibles a su imagen especular. Lo mismo ocurre con el hombre. Si reflejamos sus aminoácidos, pasarán de ser de mano izquierda a ser de mano derecha. Si reflejamos las hélices alfa de sus proteínas, se convertirán de dextrorsas en sinistrorsas. Prácticamente ninguna molécula del cuerpo, aparte las de agua, dejará de transformarse, al ser reflejada en el espejo, en una molécula que, como dice Alicia, va "del otro lado".

14. Moléculas vivas

En matemáticas se pueden trazar líneas claras y precisas que dividan las entidades matemáticas en dos clases. Una estructura geométrica es superponible a su imagen especular o no lo es. Una estructura asimétrica es a derechas o a izquierdas. Todo número entero es par o impar. No hay número entero cuyo carácter, a este respecto, sea dudoso. Pero en el mundo mismo, excepto en el nivel subatómico de la teoría de los cuantos, las líneas divisorias son casi siempre vagas. ¿Es el alquitrán un sólido o un líquido? ¿Es el *chartreuse* amarillo o verde? La mayoría de las propiedades físicas forman un espectro continuo que se va difuminando imperceptiblemente de un extremo a otro. No importa cómo se le divida, siempre habrá objetos tan próximos a la línea divisoria que el lenguaje corriente no es lo bastante preciso para permitir decir si al objeto le corresponde estar a uno u otro lado.

La propiedad de la *vida* es uno de esos continuos.

Para demostrarlo no tenemos más que fijarnos en los virus. Éstas son las estructuras biológicas más pequeñas conocidas que tienen la facultad de "comer" (absorber sustancias de su entorno), crecer y hacer copias exactas de sí mismas. Son mucho más pequeñas que las bacterias (de hecho algunos virus *infectan* las bacterias). Pasan a través de un fino filtro de porcelana. Millones de ellos pueden caber en la cabeza de un alfiler. Dado que son más pequeños que la longitud de onda de la luz, no son visibles al microscopio lumínico corriente; pero los bioquímicos tienen procedimientos ingeniosos para deducir su estructura de lo que ven cuando los bombardean con rayos X o con haces de partículas elementales.

Es verdad que se puede decir que un cristal "crece", pero crece de un manera relativamente trivial. Cuando un cristal está en una

disolución que contiene un compuesto similar a él, el compuesto se depositará en su superficie; cuanto más se deposita, más crece el cristal. Pero los virus, como todos los seres vivos, crecen de manera más asombrosa. Toman elementos de su entorno, sintetizan con ellos compuestos que no existen en el entorno, después reúnen estos compuestos para elaborar una estructura compleja que es duplicado suyo. El poder de un virus para infectar y a veces matar un organismo es debido a esta facultad. Invade las células del organismo que le hospeda, donde toma posesión de la maquinaria celular, proporcionándole, por así decirlo, nuevos planos. Ordena a la célula dejar de hacer lo que hace normalmente y que comience a elaborar las sustancias necesarias para fabricar copias del virus invasor.

Por su facultad de *repetirse* (fabricar copias de sí mismos), el virus actúa como un ser vivo. Pero cuando se le separa de los tejidos vivos, ¡cristaliza! Estos cristales de virus toman a menudo la forma de bellos poliedros regulares o semirregulares: tetraedros, icosaedros, dodecaedros, dodecaedros rómbicos, etc. Los cristales de virus son completamente inertes, no muestran signo alguno de vida. Están tan "muertos" como un trozo de cuarzo. Pero si se pone uno de estos cristales dentro de una especie vegetal o animal susceptible de infección, inmediatamente comienza su acción mortal.

El primer virus descubierto y uno de los más estudiados es el sencillo virus que produce la enfermedad del "mosaico" en las plantas de tabaco. Este virus cristaliza en delgados bastones que pueden ser vistos al microscopio electrónico. Recientemente se ha descubierto que cada bastón es en realidad una estructura helicoidal dextrorsa formada por unas 2.000 moléculas idénticas de proteína, cada una de las cuales contiene más de 150 subunidades aminoácidas. Las moléculas de proteína se enroscan alrededor de un centro hueco que va de un extremo a otro del bastón. Incrustada en la proteína (no en el centro, como se pensaba anteriormente) hay una hebra helicoidal dextrorsa de un compuesto de carbono llamado *ácido nucleico*.

El ácido nucleico no es una proteína, pero, como ésta, es un polímero: un compuesto con una molécula gigante que consiste en pequeñas moléculas enlazadas en una cadena. Las subunidades, llamadas *nucleótidos*, están compuestas de átomos de carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y fósforo, pero mientras que las proteínas tienen unas veinte subunidades distintas de aminoácidos, los ácidos nucleicos no tienen más que cuatro nucleótidos diferentes. Miles de nucleótidos pueden enlazarse, como hacen las subunidades amino-

ácidas de proteína, en una variedad casi infinita de combinaciones, para formar miles de millones de moléculas diferentes de ácido nucleico. Como los aminoácidos, los nucleótidos son asimétricos y "a izquierdas". Por esta razón, el espinazo de una molécula de ácido nucleico, como el espinazo de una molécula de proteína, tiene una forma helicoidal levotrorsa.

Los ácidos nucleicos tienen dos variedades, el DNA (ácido desoxirribonucleico) y el RNA (ácido ribonucleico). Todo virus está compuesto de una envoltura de proteína que encierra una o más espirales o bobinas de ácido nucleico. El virus del mosaico del tabaco contiene sólo una de RNA. Algunos virus contienen únicamente DNA, y otros contienen los dos tipos de ácido nucleico. Está fuera de duda que es el ácido nucleico, no la proteína, lo que mata al huésped. Cuando un virus ataca a una bacteria, la parte de proteína del virus se adhiere a la parte exterior de la célula de la bacteria, donde permanece mientras la espiral del ácido nucleico perfora y penetra en la célula y comienza a dar órdenes a la maquinaria repetidora celular. Muy pronto la célula empezará a producir duplicados no de sí misma, sino del virus. Cientos de duplicados del virus invasor, provistos de células de proteína y espirales internas de ácido nucleico, que brotan de la célula para invadir otras células.

Como las hélices de proteína, las hélices dextrorsas del ácido nucleico a menudo se enroscan, formando hélices dextrorsas de gran tamaño. En 1962 bioquímicos de la Universidad de Yale describieron la estructura de un virus que contenía una "espiral de espiral de espirales" de ácido nucleico. El virus es el bacteriófago T-2. (Un bacteriófago es un virus que solamente infecta bacterias.) Tiene una cabeza en forma de lo que se llama "prisma hexagonal bipiramidal". (Véase figura 41.) Adherida a su cabeza tiene una cola de proteína. Dentro de la cabeza, capaz de extenderse y descender por la cola, hay una sola molécula de DNA, que presenta tres niveles de helicidad. La hélice primaria es el espinazo de la molécula de DNA. Ésta se enrolla en una hélice secundaria que, a su vez, se enrolla en un pequeño carrete compacto que encaja perfectamente en la cabeza prismática del virus. El virus se adhiere por su cola a la célula huésped, y la cola perfora un pequeño agujero en la membrana de la célula. Es de suponer que un extremo de la molécula de DNA es empujado hacia el agujero por una contracción de la cola; después el pequeño carrete de la cabeza va girando en el sentido de las agujas del reloj, conforme la molécula de DNA va abriéndose paso a través de la abertura para comenzar su siniestra tarea.

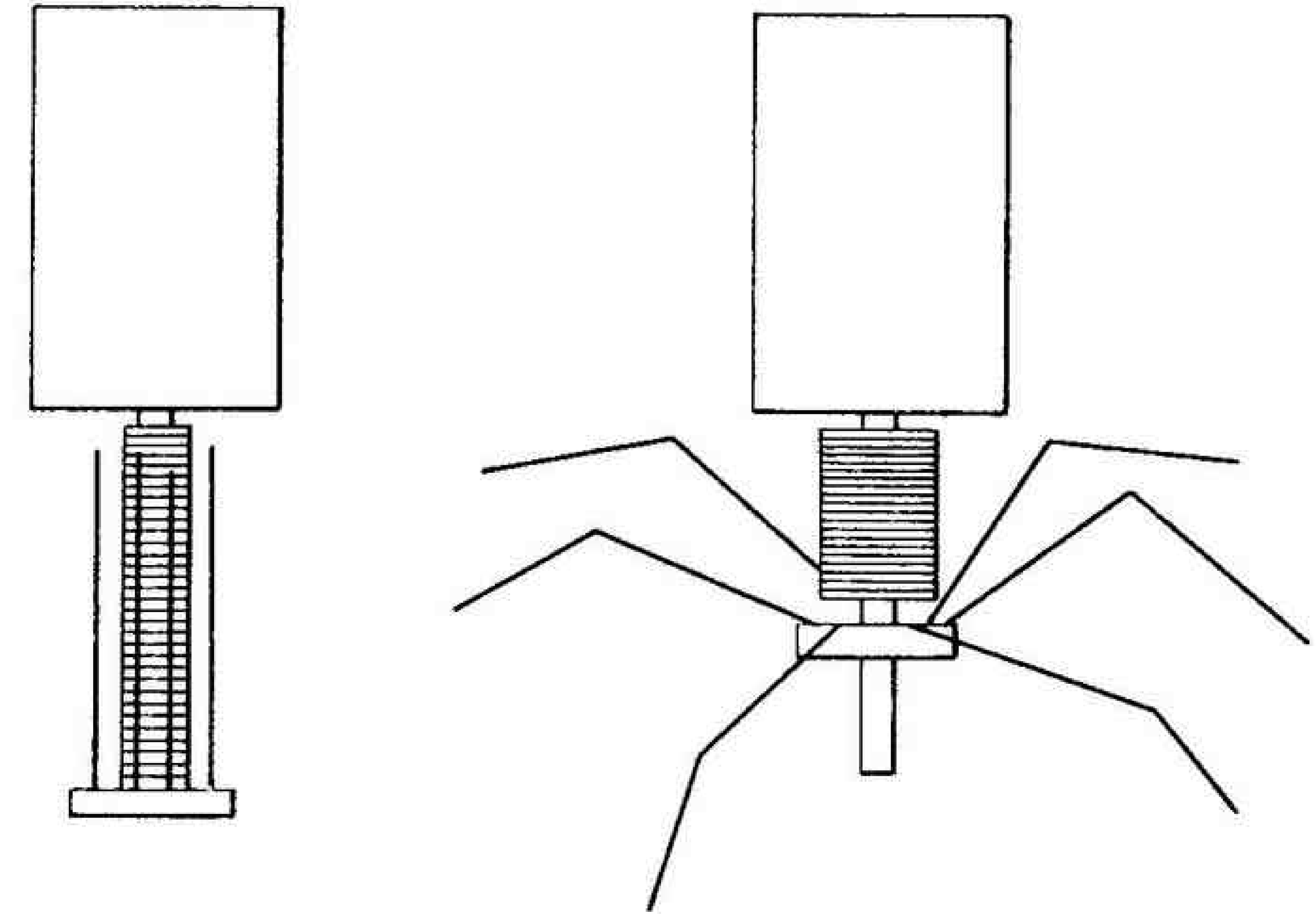


Fig. 41. Modelo de bacteriófago T-2 antes de entrar en acción (izquierda) y después (derecha). (De una ilustración en "La estructura de los virus", de R. W. Horne; *Scientific American,* enero 1963.)

El ácido nucleico no sólo se encuentra en todos los virus; en su forma de DNA está contenido en el núcleo de toda célula viva, desde los organismos monocelulares, como la ameba, hasta las células del cuerpo humano. Actualmente hay pruebas de que los evasivos genes –"partículas" submicroscópicas que contienen el código genético de información hereditaria del organismo– no son en realidad "cosas" en absoluto, como antes se pensaba. Son *regiones* a lo largo de una molécula bifilar helicoidal de DNA. En toda célula humana hay 46 estructuras similares a bastones, llamados *cromosomas,* cada uno de los cuales contiene por lo menos un par entrelazado de hélices dextrorsas de DNA. EL orden preciso de las cuatro bases nucleótidas diferentes a lo largo de cada espiral es el código genético que dice a la célula lo que ha de hacer. (Las cuatro bases, adenina, timina, guanina y citosina, se representan comúnmente con las letras A, T, G, C.) Cada aminoácido está codificado por una combinación de tres letras. Con cuatro letras hay 64 posibles combinaciones de tres letras, más que suficientes para comprender todos los aminoácidos y "deletrear" el orden exacto en que deben enlazarse para producir una proteína determinada. El "gen" es simplemente

una sección del mensaje codificado –un mensaje que se extiende de un extremo a otro de la hélice de DNA.

La distribución exacta de los "signos ortográficos" que delimitan el comienzo y fin de un gen es uno de los aspectos del código genético que en el momento de escribir estas líneas no ha sido todavía totalmente resuelto. Cada vez hay más pruebas de que en algunos casos el ADN de un virus puede contener dos, e incluso tres, mensajes solapados. Si comenzamos a leer por la primera letra de una terna, obtenemos un mensaje; al comenzar por la segunda o la tercera, podemos leer otros dos mensajes. Una burda analogía podría ser la palabra ÉPOCA: si comenzamos a leerla desde la primera, segunda y tercera letras obtenemos tres palabras diferentes con significado: ÉPOCA, POCA y OCA.

Se calcula que si todas las hélices de DNA de una célula humana se pusieran en línea recta, extremo con extremo, formarían una delgada cinta de un metro de longitud. ¿Puede una repetición de no más que cuatro símbolos diferentes, en orden lineal a lo largo de esta cinta, contener la suficiente información para regir el desarrollo de un organismo tan complicado como el ser humano? Sí puede. No cabe la menor duda de que esta cinta de un metro es capaz de contener, en su sencillo código de cuatro símbolos, información más que suficiente para suministrar un plano completo para la construcción, desarrollo y reduplicación de cada individuo humano.

En 1962 James Dewey Watson, ahora biólogo en Harvard, y los biólogos ingleses Francis Harry Compton Crick y Maurice Hugh Frederick Wilkins recibieron el Premio Nobel por su contribución al descubrimiento de la estructura de la hélice de DNA. Acaso haya sido el descubrimiento científico más importante de este siglo, superando incluso a los de la física nuclear por su potencial impacto en la historia humana. Hace una década los mecanismos de la herencia estaban velados por misterios y se pensaba que serían enormemente complicados. Ahora, de pronto, parece como si el mecanismo fuera relativamente sencillo.

Los trabajos para quebrantar el código genético han avanzado a una velocidad tan vertiginosa, que la raza humana tiene ahora la terrible capacidad de controlar y dirigir el curso de la evolución. Una completa comprensión del código puede llevar a la creación de la vida sintética, a la curación del cáncer y otras dolencias, a la comprensión de cómo el cerebro almacena sus recuerdos. Tan vertiginosa es la revolución biológica desencadenada por el descubrimiento del helicoide DNA, que hasta los políticos soviéticos han comenzado por fin a sospechar que su dilecto Trofim Lysenko (el biólogo ruso que rechazó la genética moderna como una perversión burguesa de Occidente) era en realidad un mentecato como siempre habían dicho los genéticos occidentales.

Una molécula de ácido nucleico en la célula de una planta o de un animal es una parte fija de esta célula. Por el contrario, la molécula de ácido nucleico de un virus es una especie de una serie de genes libres, errantes, no adherida a ninguna célula pero capaz de multiplicarse donde quiera que encuentre una célula huésped que contenga las sustancias que necesita para su desarrollo. ¿Podemos decir que el virus del mosaico del tabaco está "vivo"? La mayoría de los bioquímicos lo creen así. Tiene dos propiedades que distinguen fundamentalmente los seres vivos de los inanimados: puede copiarse a sí mismo y puede "mutar". (Una mutación no es más que una copia que difiere ligeramente del original; la diferencia se transmite a todas las copias subsecuentes hechas por el mutante.) Se considera que una molécula típica de ácido nucleico en una célula hará unos cuatro millones de copias exactas de sí misma antes de que, por una u otra razón, cometa un ligero error y produzca una mutante. Que se den tales mutantes es algo poco sorprendente; el hecho realmente asombroso es que se den tan *pocas*. Muchos bioquímicos no vacilan en afirmar que el helicoide RNA, en el interior de un bastón del virus del mosaico del tabaco, está "vivo" por sus propias fuerzas, y lo dicen porque es la molécula de RNA, no su caparazón de proteína, la que tiene el poder de autoduplicación y mutación.

Debemos reconocer, naturalmente, que cuando discutimos si un helicoide de DNA o de RNA es "vivo" o no, estamos embrollados en lo que esencialmente es un problema semántico. Al nivel de la molécula de ácido nucleico, el término "vida" simplemente no es lo bastante preciso para ser útil. "Azul" y "verde" son palabras eficaces en el habla corriente; pero pierden su utilidad si tratamos de aplicarlas a un color azul verdoso, o verde azulado. "Planta" y "animal" son términos útiles, pero fallan cuando se consideran formas sencillas de vida que tienen características de planta y animal. "Pájaro" y "reptil" son clasificaciones convenientes, pero ¿a cuál de ellas pertenece el *Archaeopteryx?* Este vertebrado ya extinguido está prácticamente a medio camino entre reptil y pájaro, así que es una pérdida de tiempo discutir si es un reptil que vuela o un pájaro que repta.

Lo mismo ocurre con los conceptos de ser vivo o inanimado. Aunque definamos la vida como la facultad de multiplicarse y mu-

tar, el término tiene fronteras mal definidas. No hay razón para que algún día no pueda ser construido un computador capaz de tomar partes de su entorno y fabricar réplicas de sí mismo, incluso de "mutar". John von Neumann, el gran matemático húngaro, escribió un famoso artículo, donde explicaba cómo, en teoría, semejante máquina podría ser construida. ¿Llamaríamos "viva" a esa máquina?

Consideremos también el hecho de que hay organismos vivientes, tales como las abejas obreras, que son estériles y, por tanto, no pueden copiarse a sí mismas. Sin embargo, es evidente que están vivas. Finalmente, consideremos la posibilidad, muy real, de que no esté demasiado lejos el día en que un bioquímico sintetice una molécula carbonada semejante a un ácido nucleico, capaz de fabricar una copia parcial y defectuosa de sí misma. Como se ve, aunque la autorreduplicación y la mutación se consideren como criterios básicos de vida, el concepto sigue siendo confuso. Se oye mucho estos días hablar sobre si los viajes espaciales encontrarán o no vida en Marte. Una tercera posibilidad que no se suele considerar es que los viajes puedan encontrar algo en Marte que ¡nadie sabrá si ha de ser llamado viviente o no! Por el momento, los científicos están divididos sobre la cuestión de si los datos enviados a la Tierra por la primera sonda que tomó muestras del suelo marciano son indicativos de vida o de una reacción química todavía no comprendida del todo.

El hecho manifiesto, para volver al punto expuesto antes, es que los virus ocupan un espectro continuo de complejidad estructural. El espectro palidece al retroceder hacia el mundo inanimado de los cristales y moléculas orgánicas "muertas". Y hacia delante, en las sencillas formas monocelulares de la vida vegetal o animal. Un virus es como el objeto verde-azul que puede ser llamado verde o azul. Ocupa la zona crepuscular –una cosa viva-muerta– que nuestro lenguaje no es todavía lo bastante rico para clasificar con precisión.

Sea que nosotros prefiramos llamar vivas o no a las moléculas de ácido nucleico, el hecho es que aquí los bioquímicos han aislado al fin la estructura más esencial de la vida que conocemos. Pasteur tenía más razón de la que sospechaban sus colegas cuando escribió elocuentemente acerca de la asimetría derecha-izquierda como una clave del misterio de la vida. En el interior de todas las células vivientes sobre la Tierra hay espirales dextrorsas de ácido nucleico. El doctor Crick, que vive en la Universidad de Cambridge, ha llamado a su casa *The Golden Helix* (La hélice dorada). Seguramente esta

estructura asimétrica sea la clave de la vida. Transporta toda la información que necesita un organismo vivo para desarrollarse y convertirse en la complicada máquina que es, para hacer copias de sí mismo y evolucionar por el curioso procedimiento de cometer al azar errores que se copian. «Si las proteínas son el material principal de la vida –escribió el doctor Crick en un artículo sobre "Ácidos nucleicos" (*Scientific American*, septiembre 1957)–, los ácidos nucleicos son sus planos, las moléculas en las que está escrito el Secreto de la Vida, si es que se puede hablar de tal cosa.»

Anteriormente hemos planteado ya la cuestión de si en algún otro planeta puede existir la "vida" sin compuestos de carbono. Nadie lo sabe, por supuesto, pero la mayoría de los bioquímicos creen que la autoduplicación y la mutación son, probablemente, demasiado complejas para ser llevadas a cabo por cualesquiera moléculas que carezcan de la enorme variedad y flexibilidad de los compuestos del carbono. El silicio es el más próximo al carbono por su facultad de combinarse consigo mismo y con otros elementos para formar muchos compuestos diferentes, pero sus cadenas son relativamente cortas e inestables comparadas con las de los hidrocarburos (compuestos de carbono que contienen hidrógeno), tan esenciales para la vida en este planeta.

Una de las características más notables y menos mencionadas de la vida, como sabemos, es la facultad de un organismo para absorber compuestos de su entorno inmediato, muchos de los cuales son simétricos en su estructura molecular, y elaborar compuestos asimétricos de carbono, de la "mano" derecha o de la izquierda. Por ejemplo, las plantas toman compuestos inorgánicos simétricos como el agua y el dióxido de carbono, y con ellos elaboran almidones y azúcares asimétricos. En el capítulo anterior hemos visto cómo los cuerpos de todos los seres vivos están compuestos de moléculas asimétricas de carbono, así como de helicoides asimétricos de proteínas y ácidos nucleicos. Puesto que toda molécula asimétrica tiene una imagen especular estereoisómera, no hay razón para que toda vida en la Tierra no pudiera funcionar lo mismo si todos los organismos fueran súbitamente transformados en sus imágenes especulares. Naturalmente, si únicamente un solo organismo, un hombre, por ejemplo, fuera transformado de esa suerte, probablemente no sería capaz de sobrevivir. Su cuerpo, con sus decenas de millares de compuestos asimétricos, no tendría la "mano" idónea para digerir y utilizar el alimento asimétrico disponible. Pero si la estructura molecular de *todas* las cosas vivas en la Tierra fuera reflejada –esto es, si

todos los estereoisómeros en todos los organismos fueran transformados en su gemelo especular–, los procesos de la vida continuarían como antes.

¿Cómo adquirió la vida en la Tierra su orientación original derecha-izquierda? ¿Por qué los compuestos orgánicos siguieron la dirección que siguen, y no la contraria? ¿Por qué todas las subunidades de proteína y ácido nucleico van hacia la izquierda? No conocemos las respuestas a estas preguntas, porque nadie sabe cómo comenzó la vida sobre la Tierra. Pero cada día los bioquímicos avanzan más en sus formulaciones. En el capítulo siguiente efectuaremos un rápido recorrido por lo que la ciencia actual tiene que decir sobre este fascinante tema.

15. El origen de la vida

Casi todos los rincones de esta vieja Tierra están llenos de vida; vida en una fantástica variedad de tamaños, formas, colores, sonidos y olores. ¿Cómo comenzó la vida? ¿Se desarrollaron todos los seres vivos a partir de un sola molécula de carbono, o de muchas moléculas diferentes, formadas independientemente? ¿Siguen formándose todavía en la Tierra esas moléculas? Nadie puede pretender que conoce las respuestas. Pero por primera vez en la historia se ha acumulado suficiente información en los campos de la biología, la física, la química y la geología para justificar especulaciones serias sobre el origen de la vida.

La mayoría de los bioquímicos y geólogos de hoy día están convencidos de que la vida en la Tierra comenzó hace unos cuantos miles de millones de años, con la aparición en los mares primitivos del planeta de una o más moléculas carbonadas, algo semejantes al ácido nucleico, acaso combinadas con algo parecido a proteínas, y capaces de autoduplicación. La aparición de tal molécula (o moléculas) no requiere –según estos científicos– la intervención de un poder sobrenatural. Puede ser explicada satisfactoriamente a partir de las leyes físicas combinadas con las leyes de la probabilidad matemática.

Esta opinión molesta profundamente a determinados creyentes religiosos. En Estados Unidos hay millones de protestantes fundamentalistas, y su número crece continuamente, que no creen en la evolución. Estos fundamentalistas están convencidos de que hace unos seis mil años, en una serie de estupendos trucos mágicos, Dios creó todos los seres vivos. Millones de otros cristianos devotos, católicos y protestantes, aceptan la teoría de la evolución, pero creen que, en algún momento de la historia de la Tierra, hace varios miles

de millones de años, un acto especial de creación divina hizo que la primera molécula viviente (o moléculas) apareciera en la Tierra.

He de confesar inmediatamente que me parece algo profundamente impío, casi blasfemo, poner límites de cualquier clase al poder de Dios para crear las cosas de cualquier manera que Él decida. Si Dios creó un mundo de partículas y ondas que danzan siguiendo leyes matemáticas y físicas, ¿quiénes somos nosotros para decir que Él no puede hacer uso de esas leyes para cubrir la superficie de un pequeño planeta con criaturas vivientes? Un dios cuya creación es tan imperfecta que ha de estar continuamente ajustándola para hacer que funcione convenientemente, me parece un dios de baja categoría, apenas digno de culto. La creencia en una creación milagrosa, milagrosa en el sentido de que las leyes naturales son suspendidas momentáneamente por un acto especial de Dios, es lo que yo gusto llamar "la superstición del dedo": la creencia de que Dios viene periódicamente a Su Universo a remendarlo, por así decirlo, de varias maneras. Ésta fue precisamente la superstición que hizo tan difícil a los cristianos del siglo XIX aceptar la evolución. Pero cuando la evidencia científica de la evolución llegó a ser abrumadora, al fin quedó claro para la mayoría de los teólogos que no había ninguna razón para que no pudiera ser aceptada; la evolución era sencillamente el procedimiento de Dios para crear nuevas formas de vida.

Hoy es difícil encontrar un solo bioquímico o geólogo, aun entre los más devotamente religiosos, que tenga la más ligera duda sobre la validez esencial de la teoría de la evolución. Puede haber algunas discrepancias sobre los detalles, pero ninguna sobre el conjunto. Cuando un organismo vivo fabrica una copia de sí mismo, la copia es casi siempre, pero no siempre, perfecta. En raras ocasiones algún tipo de radiación (tal como la luz ultravioleta del Sol, los rayos cósmicos o la radiación de las sustancias radiactivas que hay en la Tierra) hace blanco en el helicoide de ácido nucleico y dispone sus átomos de manera ligeramente diferente. El código genético queda alterado; hace entonces copias que difieren en alguna manera ligera y fortuita del original. Por lo general, el cambio es nocivo para el organismo, y en este caso el mutante y su descendencia es menos probable que sobrevivan y perpetúen el cambio nocivo. Cuando el cambio es beneficioso, el mutante y su descendencia tienen más probabilidades de sobrevivir que el término medio. De esta forma, la "selección natural" produce lentas modificaciones que tienen lugar en largos períodos de tiempo, y surgen nuevas "especies". La evolución es simplemente el proceso por el cual el azar (las mutaciones fortuitas) coopera con la ley natural para crear formas vivientes cada vez mejor adaptadas para sobrevivir.

Si esta unión de naturaleza y azar puede ser el método de Dios para crear nuevas especies, ¿por qué no puede una unión semejante de naturaleza y azar ser el método de Dios para crear las primeras moléculas "vivas"? Esta opinión no hace a la vida menos milagrosa o misteriosa. Como dijo Loren Eiseley con tanta elocuencia al final de su libro *The Immense Journey*, esto únicamente hace más maravillosas y misteriosas a las partículas elementales. «Si la materia "muerta" ha construido este curioso paisaje de grillos violinistas, de cantos de gorriones y hombres desconcertados –escribe–, debe estar claro aun para el materialista más acérrimo que la materia de que habla contiene poderes asombrosos, si no aterradores, y puede no ser imposible, como Hardy ha sugerido, que no sea "más que una careta usada por la Gran Faz que está detrás".»

Remontémonos con la fantasía a aquellas desoladas edades primitivas, hace tres o cuatro mil millones de años, cuando ningún ser vivo se movía en la faz de la Tierra o en sus aguas. ¿Cómo llegó a existir la primera molécula "viva"? ¿Extendió Dios su mano y con su dedo (hablo metafóricamente) juntó algunos átomos de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y azufre, formando un polímero gigante capaz de autoduplicación? No podemos decir que tal suceso no haya tenido lugar. Pero *podemos* buscar una explicación más seria, más en armonía con una concepción más amplia de la divinidad.

Acaso esporas de moléculas vivas, procedentes de algún otro lugar del Universo, cayeran en los océanos de la Tierra y encontraran en ellos un medio capaz de sostenerlas. Cierto número de científicos han apoyado esta teoría. Svante Arrhenius, un famoso químico sueco, escribió un libro entero en defensa de esta opinión. El libro, *Mundos en formación*, mantiene que la vida en la Tierra pudo tener su origen en esporas congeladas impulsadas a través de los espacios interestelares por la presión de la radiación procedente de las estrellas.

Una idea parecida de que las esporas vivas fueran transportadas a la Tierra por meteoritos ha sido resucitada recientemente en virtud de diversos estudios sobre la composición de determinados tipos de meteoritos ricos en carbono. En 1961, un grupo de científicos americanos dio cuenta de que había encontrado cierto número de hidrocarburos complejos, muy parecidos a los que se encuentran en la

Tierra en los seres vivos, en una muestra sacada de un meteorito propiedad del Museo Americano de Historia Natural. Más tarde, ese mismo año, otro grupo de científicos de Estados Unidos encontraron en meteoritos algunas partículas microscópicas que podían ser fósiles de un sencilla vida vegetal. Un científico anunció que había extraído microorganismos *vivos* de un meteorito, pero la opinión general entre especialistas es que encontró contaminantes recogidos en la atmófera terrestre. Los bioquímicos están dispuestos a admitir que los meteoritos pueden contener pruebas *fósiles* de organismos que vivieron en otro tiempo. También tienden a dudar de que la vida misma pueda sobrevivir a los azares de la radiación de un viaje a través del espacio, sea en un meteorito, sea en la forma de esporas libres.

Sin embargo, ya no queda duda alguna de que en procesos químicos ocurridos fuera de la Tierra se han formado compuestos carbonados francamente complejos, tan esenciales para la vida tal como la conocemos. En la madrugada del 28 de septiembre de 1969 hizo explosión un meteorito sobre la ciudad de Murchison, en Australia. Era del tipo llamado condrita carbonácea, extraordinariamente rico en carbono. Un equipo de científicos, encabezado por Cyril Ponnamperuma, un bioquímico de Sri Lanka, descubriría posteriormente diversos aminoácidos en un fragmento de este meteorito. Después de aquella fecha, se han encontrado aminoácidos en otros meteoritos.

En 1978, científicos de la NASA demostraron que un meteorito de condrita carbonácea, hallado en lo alto del casquete helado de la Antártida, contenía metano. Fue la primera demostración de la existencia de metano fuera de nuestro sistema solar.

Desde 1969 se ha venido informando de la presencia de aminoácidos en meteoritos, aunque la opinión dominante era que eran producto de la contaminación. «Basta dejar la huella del pulgar en una probeta, y agitar en ella un poco de agua, para obtener aminoácidos», fueron las palabras con que lo expresó Ponnamperuma. Pero en el caso del meteorito de Murchison tal posibilidad fue descartada. La principal razón para ello fue que cada uno de los aminoácidos detectados se presentó en proporciones casi idénticas de isómeros "a izquierdas" y "a derechas". De haber sido de origen terrestre, todos ellos hubieran sido "a izquierdas".

Aproximadamente al mismo tiempo que se descubrían aminoácidos en los meteoritos, se hacía en radioastronomía un descubrimiento sorprendente, de naturaleza afín: se obtuvieron pruebas sólidas de que en el espacio interestelar se hallaban presentes docenas de moléculas orgánicas. En la constelación de Sagitario, por ejemplo, hay miles de millones de moléculas de alcohol que van a la deriva, de acá para allá. Se ha detectado también formaldehído, cianuro de hidrógeno y ácido fórmico. Parece como si hubiera fuerzas capaces de crear moléculas orgánicas complejas prácticamente en todos los lugares del Universo.

En un nivel más fantástico, los escritores de ciencia-ficción han imaginado formas más altas de inteligencia que viajan a través del Cosmos y "siembran" los planetas que tienen condiciones físicas y químicas favorables a la vida. Thomas Gold, astrofísico inglés, sugirió una vez que la vida en la Tierra pudo haber procedido de microbios que había en la basura dejada por astronautas no terrestres que visitaron nuestro planeta hace miles de millones de años.

La mayoría de los bioquímicos rechazan la idea de que la vida en la Tierra tenga origen extraterrestre. Sus razones no son tanto la falta de pruebas para esta hipótesis o las dificultades de explicar cómo la vida puede resistir la radiación cósmica en sus viajes a través del espacio; sus ideas descansan principalmente en la creciente evidencia de que los organismos vivientes pudieran fácilmente haberse formado espontánea y directamente aquí, en la Tierra.

La "generación espontánea", en el sentido de una producción constante de seres vivos a partir de la materia no viva, ha sido defendida vigorosamente por muchos grandes biólogos, desde la época de Aristóteles hasta Pasteur. Antes de que la teoría de la evolución quedase bien establecida, se pensaba que toda clase de formas vivientes, incluso los ratones, se engendraban espontáneamente del légamo y fango o de tejidos de animales descompuestos. En tiempos de Pasteur, la mayoría de los químicos creían que los microbios se engendraban espontáneamente en el agua estancada. Por una serie de experimentos sencillos, pero concebidos brillantemente, Pasteur demostró de una vez para siempre que esto era falso. Los biólogos que creían haber encontrado pruebas para su teoría, simplemente no habían tenido cuidado de evitar que los microbios transportados por el aire se deslizasen en sus tubos de ensayo. Hoy no hay un bioquímico de renombre que piense que los microorganismos son engendrados en cualquier lugar de la Tierra a partir de materia inanimada. Lo más que podría ocurrir sería la aparición ocasional de moléculas primitivas, semivivientes en la superficie del mar, donde serían rápidamente engullidas por los microorganismos vivos. Y aun esto parece sumamente improbable.

Sin embargo, los bioquímicos creen que la generación espontánea debió tener lugar al menos una vez, hace tres o cuatro mil millones de años, cuando las condiciones físicas y químicas de la Tierra eran muy diferentes a las de hoy. Los océanos, no salinos, probablemente contenían grandes cantidades de amoníaco y anhídrido carbónico. No había oxígeno libre en la atmósfera que formase una capa protectora de ozono y protegiese a la Tierra de la potente radiación ultravioleta del Sol. La radiación, al caer sobre las aguas primigenias, podría haber suministrado la energía suficiente para transformar algunas de las sencillas moléculas de hidrógeno del mar en cadenas más complejas de moléculas. Otras fuentes de energía podrían haber sido el calor de la Tierra, que tal vez fuera mucho mayor que ahora; el rayo que debió caer sobre la superficie del mar, la radiación de las sustancias radiactivas del interior de la Tierra y la radiación cósmica. En un largo período, acaso más de mil millones de años, con los océanos agitándose y arremolinándose, es bastante razonable suponer que pudieron formarse millones de diferentes moléculas complejas carbonadas.

Los escritores de ciencia (y algunos científicos) tienden a sobredramatizar la súbita aparición de una molécula, acaso una molécula de ácido nucleico, capaz de autorreduplicación; una especie de "Adán" químico que inició el drama de la evolución. Nadie puede decir que no ocurrió de esta manera, pero es más probable que no hubiera ese dramático punto crucial. La autorreduplicación es una cuestión de transición. Primero pudieron aparecer moléculas orgánicas de reduplicación parcial, incompleta, que después se multiplicaron rápidamente para formar millones de toscas copias. Aun en el caso de que conociéramos los detalles de lo ocurrido a lo largo de estos millones de años que precedieron al comienzo de la historia fósil, no podríamos señalar un año, ni siquiera un período de mil años, y decir: "Aquí comenzó la vida." Pudo producirse un aumento gradual de complejidad, a lo largo de un proceso continuo, hasta que finalmente comenzaron a aparecer moléculas orgánicas con una estructura similar a la de las moléculas de ácido nucleico que hoy se encuentran en los seres vivos.

Muchos científicos, con fuerte apego emocional a la superstición del dedo, se han mofado de la idea de que combinaciones fortuitas de moléculas orgánicas en los mares primordiales pudieran producir una combinación tan compleja estructuralmente como el ácido nucleico. Uno de los primeros y más elocuentes de tales burlones fue Francis Robert Japp, un químico escocés del siglo XIX, de la Universidad de Aberdeen. En una memoria muy discutida sobre "Estereoquímica y vitalismo" (publicada en *Nature*, 8 de septiembre, 1898) hacía un excelente resumen de los trabajos de Pasteur sobre los estereoisómeros, y después se lanzaba a una vigorosa defensa del origen sobrenatural de las primeras moléculas asimétricas. El estereoisomerismo de una sola "mano" –sostenía– no podía haber surgido de las ciegas operaciones de las fuerzas simétricas de la naturaleza.

«Únicamente los organismos vivos con sus tejidos asimétricos –escribió Japp–, o los productos asimétricos de los organismos vivos, o la inteligencia viviente con su concepción de la asimetría, pueden producir el resultado. Sólo la asimetría engendra asimetría... Si estas conclusiones son correctas, como creo, entonces el *origen absoluto* de los compuestos de asimetría unilateral que se encuentran en el mundo viviente es un misterio tan profundo como el propio origen de la vida. La fortuita concurrencia de átomos, aun teniendo toda la eternidad para ellos, entrechocándose y combinándose, no pudo dar lugar a la formación del primer compuesto orgánico ópticamente activo. La coincidencia queda excluida, y toda explicación puramente mecánica del fenómeno tiene que fracasar necesariamente.»

La memoria de Japp suscitó una considerable controversia entre los lectores de *Nature*. Muchos distinguidos científicos y pensadores, entre ellos Herbert Spencer, Karl Pearson y George FitzGerald (el hombre que elaboró la matemática de la teoría Lorentz-FitzGerald de la contracción en la relatividad), escribieron cartas de protesta que fueron publicadas en *Nature* junto con numerosas contrarréplicas de Japp[1].

Los argumentos del profesor Japp fueron resucitados en un libro muy leído de Lecomte du Noüy, *Human Destiny* (1947), y repetidos en su libro posterior, *The Road to Reason* (1949). Las probabilidades de que una compleja molécula orgánica asimétrica no se haya formado de manera fortuita son tan grandes –sostenía du Noüy– como para llegar a la virtual certidumbre de que el suceso no pudo tener lugar sin la intervención divina. Los argumentos de Japp y du Noüy han sido recogidos recientemente por Fred Hoyle, astrónomo británico. En libros, artículos y conferencias, Hoyle sostiene que algún tipo de Mente dirigió el origen de la vida, no en la Tierra, sino en el espacio exterior. Considera que hay una posibilidad entre $10^{40.000}$ (1 seguido de 40.000 ceros) de que la vida se originara a partir de combinaciones de aminoácidos. Hoyle compara esta probabilidad con la de que un meteoro, al caer en un juncal

produzca un Boeing 747, o de que se resuelva el problema del cubo de Rubik manipulándolo al azar. Sería tanto como esperar que una obra de Shakespeare fuera escrita por monos tecleando en una máquina de escribir. A este respecto, el astrónomo inglés Arthur Stanley Eddington dijo:

> Una vez era un sesudo mandril
> que siempre estaba soplando en un trombón
> porque decía: "No cabe duda
> de que en mil millones de años
> seguramente daré con una tonada"[2].

La probabilidad de que el mandril de Eddington acertara con una tonada es difícil de calcular si no se define primero lo que se quiere decir con la palabra "tonada". Nadie esperaría que un chimpancé, goteando o esparciendo pintura sobre un lienzo, produjera una réplica de la *Mona Lisa,* pero si la palabra "pintura" incluye todos los productos de los expresionistas abstractos contemporáneos le sería difícil a un chimpancé convenientemente instruido, *no* producir una pintura. Una dificultad semántica similar se encuentra al tratar de calcular la probabilidad de la aparición fortuita de una molécula orgánica compleja. ¿Cuán complejo es "complejo"?

En 1952 un joven químico americano llamado Stanley L. Miller (tenía entonces veintitrés años) produjo realmente algunos aminoácidos complejos mediante una sencilla técnica destinada a probar una teoría sugerida por su maestro, el famoso químico Harold Urey. Miller introdujo en una redoma una mezcla de agua, amoníaco, metano e hidrógeno –una mezcla que el profesor Urey creía que era similar a la mezcla de elementos en los océanos y la atmósfera primordiales de la Tierra–. La energía fue suministrada por una descarga eléctrica pasada a través de la mezcla continuamente durante una semana. Cuando la mezcla fue analizada al terminar este tiempo, Miller encontró varios compuestos orgánicos, entre ellos aminoácidos, que antes no había allí.

Es cierto que queda por recorrer un largo camino hasta producir ácido nucleico o incluso proteína, pero los aminoácidos son los bloques asimétricos de construcción de la proteína. Sobre la base de los métodos de Japp y Du Noüy para calcular probabilidades no se habría podido esperar ni siquiera un humilde aminoácido en un período tan increíblemente corto como una semana y con medio real de productos químicos. El experimento fue una piedra miliar en la

historia de las teorías del origen de la vida. Ha sido repetido por otros muchos científicos empleando mezclas y fuentes de energía ligeramente diferentes[3].

En 1963, Ponnamperuma y sus colaboradores consiguieron producir de modo similar uno de los principales componentes del ácido nucleico. Un haz de electrones de alta energía fue disparado a través de una mezcla de hidrógeno, amoníaco, metano y vapor de agua durante cuarenta y cinco minutos. En la mezcla se encontraron pequeñas cantidades de adenina, una de las cinco bases nucleótidas. Más recientemente, Sidney W. Fox y Kaoru Harada, de la Universidad de Florida, lograron sintetizar trece clases diferentes de aminoácidos empleando como fuente de energía únicamente calor (unos 1.000 grados centígrados). En 1967, Arthur Kornberg y sus colegas de la Universidad de Stanford produjeron artificialmente el núcleo interior, activo e infeccioso, de un virus. Al ser inyectado en células vivas, las células infectadas comenzaron a producir virus indistinguibles de los originarios. En 1969, dos equipos de investigación norteamericanos sintetizaron la ribonucleasa, una enzima formada por diecinueve tipos de aminoácidos. Después de estos experimentos, ningún científico se atreve a asegurar que los compuestos orgánicos complejos no pueden ser resultado de una acción conjunta del azar y las leyes naturales.

¿Dónde se equivocaron Japp y du Noüy? El fallo principal de su argumentación es el siguiente. En los arremolinados compuestos existentes en los mares primordiales de la Tierra actuaba no sólo el azar: había que contar también con las leyes de la física y de la química. Si se desparrama una bolsa de habas sobre una mesa es improbable que formen un dibujo con simetría hexagonal regular. Pero sabemos que cuando el agua se congela durante una tormenta de nieve forma millones de esas formas hexagonales. La razón es, naturalmente, que las fuerzas eléctricas de atracción y repulsión actúan entre las moléculas de tal manera que la formación de esas sorprendentes formas no sólo es posible, sino sumamente probable.

Isaac Asimov lo ha explicado así: «Supongamos que tomamos átomos de hidrógeno y oxígeno y los combinamos *al azar* para formar moléculas con tres átomos cada una, suponiendo que puedan formar cualquier combinación, tales como HHH, HHO, HOH, HOO, etc. De esta mezcla extraemos diez moléculas al azar. ¿Qué probabilidades hay de que todas sean HHO, es decir, moléculas de agua?» Según el cálculo de Asimov, las probabilidades son aproximadamente de 1 contra 60.000.000. Sin embargo, todos sabemos que si

realizamos efectivamente tal experimento los átomos no se combinan al azar. *Todas* las moléculas formadas serían moléculas de agua, a causa de que es la única combinación de tres átomos químicamente posible para los átomos de oxígeno e hidrógeno. Lo que Japp y du Noüy no tuvieron en cuenta fue la acción de las leyes naturales. Los átomos, como dice Asimov, no son como canicas pegajosas que cuando se las agita en un cubo pueden adherirse unas a otras de cualquier manera, sino que se combinan de manera determinada de acuerdo con las leyes físicas.

El hecho puro y simple, es que no sabemos lo bastante acerca de las fuerzas eléctricas que actúan en los átomos de una mezcla de compuestos de carbono, en las condiciones que reinaban en la Tierra antes de que se pusiera en marcha la evolución, para hacer algún cálculo digno de tenerse en cuenta de las probabilidades de una combinación particular. Ciertas combinaciones pueden ser imposibles, y otras sumamente probables. El gran error de du Noüy fue calcular las probabilidades de una molécula que se reduplica sobre el supuesto de que los átomos se combinan por el ciego azar. Debió preguntarse –escribe Asimov– cuáles serían las probabilidades de que tal molécula pudiera tener su origen en la acción *no ciega* del azar; es decir, la acción del azar concertada con las leyes físicas y químicas. Por lo que sabemos, las condiciones primordiales habrían hecho difícil que los aminoácidos *no* se formasen, y una vez formados también sería difícil que *no* se unieran en complejas cadenas.

Sabemos que sólo se precisó una semana para la fortuita producción de aminoácidos asimétricos con una pequeña cantidad de productos químicos en la redoma de Miller. Concedamos mil millones de años de tiempo a una mezcla química tan grande como los mares y la atmósfera de la Tierra, y diversas fuentes de energía más intensas que las de hoy; ¿quién puede decir que no pudieron formarse fortuitamente moléculas autorreduplicantes? Por lo que sabemos, pudieron haberse formado por miles de millones. Acaso primero se unieron los aminoácidos para formar miles de millones de diferentes moléculas de proteína. Quizá una molécula de ácido nucleico, o algo que se le pareciera, se adhirió después a un trozo de proteína y se produjo algo que era capaz de copiarse a sí mismo con toda precisión donde quiera que encontrase las proteínas adecuadas. En unos cuantos miles de millones de años (todo esto es pura conjetura), el caldo primordial pudo estar plagado de estos primitivos organismos semivivientes. La gran epopeya de la evolución se había puesto entonces en marcha.

16. El origen de la asimetría

En cierto modo, resulta divertido encontrar en nuestros días a tantos bien intencionados teístas que retroceden con horror ante teorías encaminadas a salvar la brecha entre la vida y la no vida por la acción del "azar no ciego", es decir, la conjunción del azar y ley natural. Es divertido porque es más fácil imaginar salvada *esta* brecha que muchas de las otras que existen en la historia de la vida sobre la Tierra. Por ejemplo, fue preciso descubrir la clorofila, que es el medio por el cual unidades vivientes (las plantas) pueden emplear la energía solar para fabricar almidones y grasas. Los animales unicelulares tuvieron que descubrir el recurso de comer plantas. Muerte y sexo tuvieron que ser inventados por los organismos pluricelulares capaces de llegar a viejos y cesar de funcionar como colonia cooperativa de células. Los animales tuvieron que descubrir cómo comer a otros animales. Sobre todo, tuvo que evolucionar una especie inteligente de animal, una especie tan hábil que ha descubierto una manera de hacer estallar la Tierra y poner término a todo el proceso evolutivo. A un observador extraterrestre algunos de estos pasos pueden muy bien parecerle menos probables que el paso inicial de la materia sin vida a la materia viva.

¡Cómo se habría excitado y entusiasmado Pasteur si hubiera conocido el famoso experimento de Miller! Aunque era un teísta, estaba convencido de que Dios había creado la vida en la Tierra gracias a la combinación de sustancias químicas, fuerzas y azar. Reconoció también, como hemos visto, que los compuestos orgánicos de los seres vivos son ópticamente activos; es decir, que poseen una asimetría interna capaz de hacer girar los planos de luz polarizada. También quedó impresionado, y es natural, por el hecho de que fuera de los tejidos vivos los compuestos asimétricos siempre se en-

contraban en la forma racémica: una mezcla de moléculas de la "mano" derecha y de la izquierda. Únicamente en los tejidos vivos tienen los compuestos orgánicos quiralidad pura.

Pasteur creía que si pudiera tan sólo descubrir cómo la naturaleza introdujo la asimetría en los compuestos orgánicos, estaría muy cerca del secreto de la vida misma. Le parecía probable que algún género de asimetría en el medio ambiente terrestre habría proporcionado las fuerzas asimétricas que debieron actuar sobre las primeras unidades vivas, dándoles una torsión asimétrica. «La vida tal como se nos manifiesta –escribió– es una función de la asimetría del Universo y de las consecuencias de este hecho... Yo puedo incluso imaginar que todas las especies vivientes son primordialmente, en su estructura, en sus formas externas, funciones de la asimetría cósmica.»

Pasteur creía que el magnetismo ofrecía un deslumbrante ejemplo de asimetría natural en el Universo. Si se coloca una aguja magnética encima de un alambre a través del cual pasa una corriente alejándose directamente de nosotros, la aguja tomará una posición en ángulo recto con el alambre. En lugar de señalar con su polo norte a la derecha tan a menudo como señala a la izquierda, la aguja señala siempre a la izquierda. Como veremos en el capítulo 19, esto solamente *parece* ser un fenómeno asimétrico, pero en la época de Pasteur el magnetismo era muy poco comprendido y todos los científicos de aquella época pensaban que el magnetismo poseía una asimetría fundamental en contraste con fuerzas simétricas tales como la gravedad y la inercia. Fundándose en esta creencia, Pasteur realizó una gran variedad de experimentos fantásticos. Por ejemplo, hizo crecer cristales entre los polos de potentes imanes esperando que se produjera una mayoría de cristales de cierta "mano". Pero quedó desilusionado por su completo fracaso al tratar de inducir la asimetría en cristales o compuestos por la aplicación del magnetismo.

Otra posibilidad que imaginó Pasteur fue que el paso del Sol por el cielo del este al oeste podía ejercer una influencia asimétrica sobre las sustancias. Como la Tierra tiene polos magnéticos norte y sur, acaso el movimiento del Sol, combinado con el magnetismo terrestre, pudiera inducir la asimetría. Mediante el uso de hábiles combinaciones de espejos y mecanismos de relojería pudo cultivar plantas en condiciones en que la luz del Sol pasaba realmente sobre la planta desde el oeste al este, en lugar de seguir la dirección habitual. Pasteur esperaba que de este modo la planta desarrollaría sustancias ópticamente activas que harían girar la luz polarizada en dirección opuesta a la que normalmente se espera. Otra vez los resultados fueron desalentadoramente negativos.

Nadie sabe aún cómo la primera molécula semiviviente, o las primeras moléculas semivivientes, adquirieron su particular orientación o "mano". Como hemos visto, en los tejidos vivos todos los aminoácidos tienen la misma torsión, a izquierdas. Esto es suficiente para explicar la uniformidad en la "mano" de todas las hélices de proteína. Lo mismo puede decirse de los nucleótidos, que imprimen su torsión a izquierdas a las bobinas de ácido nucleico. Si por puro accidente hubiera ocurrido que la primera molécula capaz de autorreduplicación fuera de la "mano" izquierda en lugar que de la derecha, entonces naturalmente todas sus copias serían "a izquierdas". Se explicaría así la universalidad de la "mano" izquierda en los aminoácidos y nucleótidos. La asimetría engendra asimetría. La molécula "Adán" se enlazaría únicamente a las proteínas de la misma "mano"; después, las copias transmitirían esta misma "mano" a todas las copias posteriores. Si la primera molécula autorreduplicativa hubiera sido de "mano" diferente, toda la vida habría ido "del otro lado".

También es posible que millones de primitivas moléculas semivivientes, parcialmente autorreduplicativas, surgieran en la primitiva "sopa caliente" de la Tierra, y que alguna característica del entorno les diera a todas, o a la mayoría, torsión hacia la izquierda. Desde los tiempos de Pasteur se han ideado muchas teorías siguiendo las mismas líneas. Se ha pensado que la vida comenzó en un hemisferio donde las fuerzas de Coriolis suministraron de alguna manera la torsión requerida. Si la vida hubiera comenzado en el otro hemisferio, los aminoácidos, según esta teoría, serían de la "mano" derecha en vez de la izquierda. Esta teoría no ha logrado mucha aceptación.

Una sugerencia mejor: la luz polarizada elípticamente (un tipo de polarización que se produce cuando la luz es reflejada por una superficie) puede haberse combinado con el magnetismo terrestre para producir la torsión. En experimentos de laboratorio con luz polarizada elípticamente en campos magnéticos se ha logrado sintetizar compuestos de una mano. La luz reflejada por los primitivos océanos terrestres puede haber tenido esta clase de polarización, pero la mayoría de los bioquímicos no creen que el efecto pueda haber sido bastante fuerte para dar una significativa orientación hacia la izquierda a las primitivas moléculas orgánicas de la Tierra.

En 1931, un científico ruso llamado V. Vernadski hizo una

asombrosa sugerencia. Algunos astrónomos creen que la Luna fue en otro tiempo parte de la Tierra. Cuando la Luna se separó de la Tierra –razonaba Vernadski–, acaso un colosal tirón de alguna clase, de naturaleza asimétrica, comunicó una torsión hacia la izquierda a las moléculas orgánicas que se estaban formando.

Otra idea más fue propuesta por el físico Joseph Rush en su espléndido libro *The Dawn of Life* (Signet, 1962). Acaso moléculas autorreduplicativas de ambos tipos de "mano" se desarrollaron en el caldo primordial. Cada molécula se alimentaría solamente con moléculas de su propia "mano". Entonces una mutación de una molécula de la "mano" izquierda le dio la capacidad para alimentarse con moléculas de la "mano" derecha y de la izquierda, posiblemente incluso con sus competidores vivientes de la "mano" derecha. Cuando se multiplicaron, sus descendientes tendrían una fuerte ventaja al competir con rivales que únicamente podían alimentarse con su mismo tipo de "mano". Con el tiempo únicamente las especies mutantes más versátiles persistirían, y naturalmente comunicarían su "mano" izquierda a toda su progenie.

Aunque tal mutación no llegara a producirse, cabe que las moléculas de una cierta "mano" pudieran desbancar a sus respectivas simétricas de la otra "mano", por vía reproductiva. Si lanzamos una moneda al aire cien veces, es sumamente improbable que contemos *exactamente* cincuenta caras y cincuenta cruces. De igual modo, si se formaron en gran número compuestos asimétricos, es extraordinariamente improbable que el número de los dextrorsos compensara exactamente el de los sinistrorsos. Fuera cual fuese la "mano" predominante, pudo alcanzar cierta ventaja en virtud de su mayor número. Por ejemplo, un cambio súbito de las condiciones ambientales seguramente produciría una generalizada mortandad en uno y otro tipos, pero las del grupo más numeroso tendrían mayor probabilidad de sobrevivir.

Todas estas teorías son en gran manera especulaciones. Nadie puede afirmar que sabe cómo la vida terrestre adquirió su particular sistema de asimetrías. Casi todos los biólogos están convencidos de que los acontecimientos de hace miles de millones de años, cualesquiera que fuesen, no están ocurriendo ahora. Para empezar, como ya señalamos anteriormente, si se formaran moléculas semivivientes en las superficies marinas, serían rápidamente devoradas por los microorganismos. En segundo lugar, las actuales condiciones en la Tierra no son, en modo alguno, las mismas que en las primitivas eras geológicas. Las plantas han llenado la atmósfera de oxígeno, y

éste actúa a modo de parasol, que detiene gran parte de la poderosa radiación ultravioleta del Sol, radiación que pudo haber sido esencial como fuente de energía en la formación de las primeras cadenas de moléculas orgánicas. Sea como fuere lo sucedido, es probable que dejara de ocurrir hace miles de millones de años.

Pasteur era de la opinión de que la causa responsable del sesgo asimétrico que ya desde su origen han tenido las moléculas orgánicas se halla en alguna asimetría fundamental de las condiciones ambientales terrestres, que posiblemente prevalecen todavía. Pasteur se abría paso a tientas, lo mejor que podía, en una zona de vasta oscuridad. Le fascinaba el nítido y tajante conflicto entre la simetría de lo no-vivo y la asimetría de lo vivo. Sospechaba intuitivamente, con gran fuerza, que, de algún modo todavía desconocido, en el corazón mismo del Universo radicaba una asimetría fundamental. "L'univers", escribió, "est dissymétrique". Se equivocaba al pensar que el magnetismo era reflejo de esta lateralidad cósmica, universal. Sin embargo, en un capítulo posterior veremos que la sospecha de Pasteur bien puede todavía resultar cierta, si bien en un modo que en su día no podía ser concebido. Pero antes tenemos que detenernos para echar una rápida ojeada de carácter filosófico a la asimetría y a la cuarta dimensión, así como a un desconcertante problema de comunicación que facilitará la comprensión de las nociones físicas que se tratan en los restantes capítulos del libro.

17. La cuarta dimensión

Immanuel Kant, el gran filósofo alemán del siglo XVIII, fue el primer eminente pensador que halló una profunda significación filosófica en la imágenes especulares. El hecho de que un objeto asimétrico pudiera existir en cualquiera de las dos formas de simetría especular le parecía a Kant tan complicado como misterioso. Antes de discutir algunas de las conclusiones que Kant extrajo de la asimetría izquierda-derecha, veamos primero si podemos captar en alguna medida el espíritu con que abordó este tema.

Imagínese que tiene usted delante, sobre una mesa, modelos sólidos de los poliedros enantiomorfos que se ven en la figura 42. Los dos modelos son exactamente iguales en todas sus propiedades geométricas. Cada arista de una figura tiene su correspondiente arista de igual longitud en la otra. Cada ángulo de una figura tiene un ángulo igual en la otra. Ninguna medida o inspección de cualquiera de ellas revelará una sola característica geométrica que no posea la otra. Son, en cierto sentido, figuras idénticas, congruentes. Sin embargo, es evidente que *no* son idénticas.

En la sección 13 de sus famosos *Prolegómenos a toda Metafísica futura,* Kant se expresaba así: "¿Qué puede parecerse más a mi mano o a mi oreja, y ser más igual en todos los aspectos, que su imagen en el espejo? Y, sin embargo, no puedo poner la mano que veo en el espejo en el lugar de su original."

El hecho de que dos objetos puedan ser iguales en todas sus propiedades y, sin embargo, sean claramente diferentes, es sin duda la razón de que el mundo del espejo tenga esa fantástica cualidad de atractivo para los niños y los hombres primitivos cuando se enfrentan a él por primera vez. Desde luego, la principal causa de su caracter fantástico es simplemente la aparición tras el cristal de un

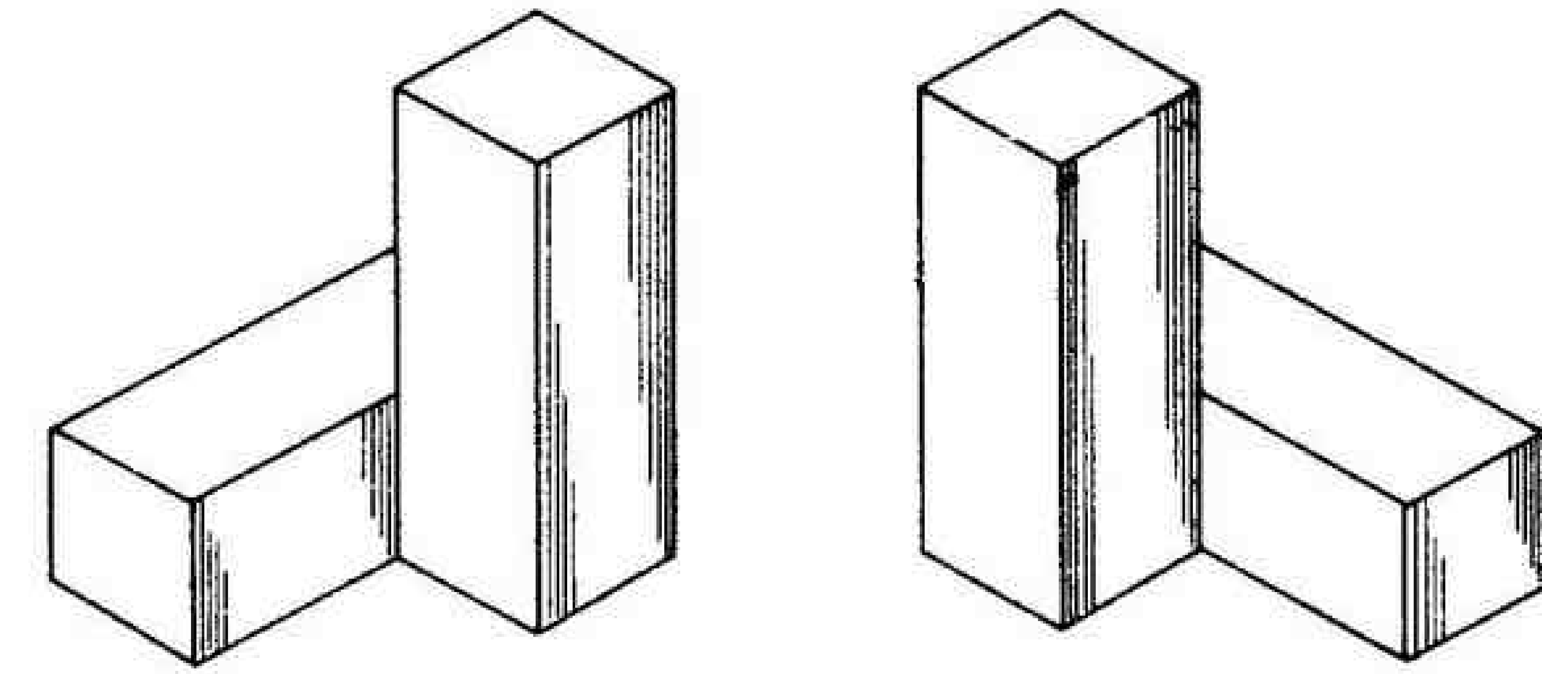


Fig. 42. Poliedros enantiomorfos.

mundo que parece tan real como el mundo frente a él y, sin embargo, es completamente ilusorio. Si se quiere desconcertar y fascinar a un niño pequeño póngasele frente a un gran espejo de pared, por la noche, en una habitación oscura, y entréguesele una linterna. Cuando proyecte la luz de la linterna sobre el espejo, el haz de luz entrará en línea recta en la habitación de detrás del cristal e iluminará cualquier objeto al que vaya dirigido. Esta fuerte ilusión de habitación duplicada ya es bastante fantástica, pero se hace aún más fantástica cuando uno se da cuenta de que todas las cosas de la habitación duplicada "van del revés". Es la *misma* habitación; sin embargo, no lo es.

Lo que Kant hizo de todo esto es una historia embrollada, técnica, llena de controversias. Durante los últimos decenios, Kant ha sido tan implacablemente ridiculizado por Bertrand Russell y otros importantes filósofos, que los lectores no informados pudieran pensar que Kant era un metafísico de cerebro confuso, que comprendía muy poco de matemáticas y ciencia. La verdad es que Kant estaba muy instruido en la ciencia y las matemáticas de su tiempo. Comenzó su carrera como profesor de física, y la mayor parte de sus primeras obras versan sobre temas científicos. Lo mismo que Alfred North Whitehead, pasó de las matemáticas y la física a la construcción de un sistema metafísico solamente en sus últimos años. Piénsese lo que se quiera de sus conclusiones, no se puede negar su contribución a la filosofía de la ciencia moderna.

La primera obra publicada de Kant, *Pensamientos sobre la verdadera estimación de las fuerzas vivientes* (1747), contiene una notable anticipación de la geometría de *n* dimensiones. ¿Por qué –pregunta– nuestro espacio es tridimensional? Concluye que esto está

relacionado de algún modo con el hecho de que fuerzas tales como la gravedad se mueven a través del espacio, desde un punto de origen, como esferas que se expanden. Su fuerza varía inversamente al cuadrado de la distancia. Si Dios hubiera creado un mundo en que las fuerzas variasen inversamente *al cubo* de la distancia, se habría requerido un espacio de cuatro dimensiones. (De modo semejante –aunque no lo mencionó– tales fuerzas, en un espacio de dos dimensiones, al expandirse a partir de un punto de origen en círculos concéntricos, variarían sólo inversamente a la distancia.) Kant había adoptado la concepción del espacio propuesta un siglo antes por Gottfried Wilhelm von Leibniz, el gran filósofo y matemático alemán. El espacio no tiene realidad independiente de las cosas materiales; no es más que una descripción abstracta, matemática, de las relaciones que hay entre objetos. Aunque la idea de una cuarta dimensión se les había ocurrido a los matemáticos, fue abandonada en seguida como una especulación fantástica sin posible valor. Nadie había reparado en el hecho de que un objeto sólido simétrico puede (en teoría) ser vuelto del revés haciéndolo girar en un espacio de dimensión mayor; hasta 1827, ochenta años después de la obra de Kant, este hecho no fue señalado, en primer lugar, por August Ferdinand Moebius, astrónomo alemán de quien recibe su nombre la "cinta de Moebius". Por esta razón, es sorprendente ver que Kant escribía ya en 1747: "Una ciencia de todas estas posibles clases de espacio (espacios de más de tres dimensiones) sería sin duda la empresa más elevada que un entendimiento finito podría acometer en el campo de la geometría... Si es posible –añadía– que existan extensiones con otras dimensiones, también es muy probable que Dios las haya traído a la existencia en alguna parte; porque sus obras tienen toda la magnitud y variedad de que son capaces. Tales espacios superiores no pertenecerían, sin embargo, a nuestro mundo, sino que deben formar mundos separados".

En 1768, en una obra *Sobre el primer fundamento de la distinción de regiones en el espacio,* Kant abandonó la concepción de Leibnitz, para adoptar la de Newton. El espacio es una cosa absoluta, fija –el "éter" del siglo XIX–, con una realidad propia, independiente de los objetos materiales. Para establecer la existencia de tal espacio, Kant volvió su atención hacia lo que llamaba "homólogos incongruentes" –figuras sólidas asimétricas de forma y tamaño idénticos, pero de opuesta "mano", tales como las conchas de los caracoles, las enredaderas, los rizos del pelo, las manos derecha e izquierda–. La existencia de tales objetos gemelos –decía– implica un

espacio newtoniano. Para probarlo empleó un sorprendente experimento conceptual que puede transcribirse como sigue:

Imaginemos que el Cosmos está completamente vacío salvo por una sola mano humana. ¿Es una mano derecha o izquierda? Como no hay diferencias intrínsecas, mensurables, entre objetos enantiomorfos, no tiene fundamento llamarla mano derecha o izquierda. Naturalmente, si usted se imagina mirando la mano, usted la verá como derecha o izquierda, pero esto equivale a ponerse usted mismo (con su propio sentido de orientación espacial) en un espacio de tres dimensiones. Usted debe imaginar la mano en el espacio, completamente al margen de toda relación con otras estructuras geométricas.

Está claro que tendría tan poco significado decir que la mano es la derecha o la izquierda, como decir que es grande o pequeña, o que está orientada con los dedos señalando hacia arriba o hacia abajo.

Supongamos ahora que un cuerpo humano se materializa en el espacio cerca de la mano. El cuerpo está entero, excepto ambas manos, que han sido cortadas por la muñeca y faltan. Es evidente que la mano no se adaptará a las dos muñecas, sino a una sola, por ejemplo a la muñeca izquierda. Por lo tanto es una mano izquierda. ¿Repara usted en la paradoja con que nos encontramos? Si así se prueba que es una mano izquierda, ya que se adapta a la muñeca izquierda, tuvo que haber sido una mano izquierda *antes* de que el cuerpo apareciera. Debe haber algún fundamento, alguna razón, para llamarla "izquierda" aun cuando sea el único objeto en el Universo. Kant no veía el modo de hallar esta razón sino suponiendo que el espacio mismo posee alguna estructura absoluta objetiva, una especie de retícula tridimensional capaz de proporcionar un medio de definir la orientación espacial de un objeto asimétrico solitario.

Un lector moderno, familiarizado con la geometría de *n* dimensiones, apenas tendría dificultad en ver a través de la confusión verbal del experimento conceptual de Kant. El error de Kant fue expuesto eficazmente en una historieta cómica de Johnny Hart, llamada B. C., publicada en la prensa el 26 de julio de 1963. Uno de los trogloditas de Hart acaba de inventar el tambor. Golpea un tronco con el palo que tiene en una mano y dice: "Esto es un toque izquierdo." Después golpea el tronco con el palo que tiene en la otra mano y dice: "Esto es un toque derecho."

"¿Cómo sabe usted cuál es cuál?", pregunta un espectador.

El tamborilero señala al reverso de su mano y replica: "Tengo un lunar en mi mano izquierda."

Veamos ahora qué relación tiene esto con el error de Kant. Imaginemos que Planilandia no contiene más que una sola mano plana. Es verdad que es asimétrica, pero no tiene sentido hablar de ella como derecha o izquierda si no hay en el plano otra estructura asimétrica. Esto es evidente a causa de que nosotros, en el espacio tridimensional, podemos ver la mano por uno y otro lado del plano y verla en una y otra de sus dos formas de imagen especular. La situación cambia si introducimos un planilandés sin manos y *definimos* la izquierda como, digamos, el lado en que está el corazón. En modo alguno comporta ello que la mano fuera "derecha" o "izquierda" antes de introducir al ser plano, ya que *podemos introducirlo en cualquiera de las dos maneras enantiomorfas.* Colocado en el plano de un manera, la mano se convierte en una mano izquierda. Volvámoslo del revés, colocándolo de la otra manera, y la mano será entonces una mano derecha, ya que se adaptará a la muñeca del lado opuesto al corazón.

¿Significa esto que la mano cambia su lateralidad, o que el corazón del planilandés salta mágicamente de un lado al otro del cuerpo? No, en absoluto. Ni la mano ni el planilandés cambian en absoluto. Es sencillamente que las relaciones de uno con el otro *han cambiado* en el espacio bidimensional. Todo es una cuestión de palabras. "Derecha" e "izquierda" son palabras que significan, como dice Humpty Dumpty, lo que queremos que signifiquen. La mano solitaria puede ser nombrada con uno u otro término. Lo mismo puede decirse de los lados de un planilandés solitario. Únicamente cuando dos objetos asimétricos están presentes en el mismo espacio y escogemos un término para uno, el término aplicado al otro deja de ser arbitrario.

Lo mismo ocurre en el espacio tridimensional. Hasta que no introducimos el cuerpo manco, bajo la inteligencia de que "izquierda" es el lado del corazón, no tenemos una base para decidir de qué mano se trata. Si el cuerpo es "vuelto del revés" haciéndolo girar en el espacio de cuatro dimensiones, la designación de la mano cambia automáticamente. Supongamos que designamos a la mano solitaria llamándola, por ejemplo, mano "derecha". Cuando el cuerpo aparezca, su muñeca derecha será, por simple definición, la muñeca a la cual se adapte la mano. Lo importante es que la elección inicial de los términos es completamente arbitraria. El troglodita de Hart que decide llamar "izquierda" a una mano, a causa de que tiene un lunar en ella, está dando un primer paso completamente racional para definir la lateralidad. La gracia de la historieta está en la manera como el troglodita expresaba su réplica. En lugar de decir que conocía la diferencia entre los toques derecho e izquierdo, a causa de que tenía un lunar en su mano izquierda, podría haber dicho: "A causa de que he decidido llamar 'izquierda' a la mano que tiene un lunar." No hay nada paradójico en tal situación, por tanto no es necesario introducir el espacio absoluto de Newton[1].

En realidad, ni siquiera un éter fijo newtoniano ayuda a designar la mano solitaria, a menos que la estructura del espacio mismo no sea de algún modo asimétrica. Si la mano flota dentro de un cosmos esférico, cilíndrico o cónico, o en un espacio infinito, entrecruzado por las líneas de una retícula cúbica, no estaremos en mejor situación que antes. Si el Cosmos tuviera forma de una enorme mano humana, la situación cambiaría. Podríamos llamarla mano cósmica "derecha" (o "más", o Yin); entonces si la solitaria mano humana es de lateralidad opuesta nos veríamos obligados a llamarla izquierda (o "menos", o Yang). Podríamos también definir la lateralidad de la mano basándonos en un "grano" asimétrico propio del espacio, una retícula submicroscópica de líneas geodésicas (las trayectorias más cortas posibles), como la retícula asimétrica del cuarzo o del cinabrio. En posteriores capítulos veremos que estas especulaciones tienen en la actualidad gran interés en relación con los recientes descubrimientos sobre el comportamiento asimétrico de ciertas partículas elementales.

El propio Kant se dio cuenta muy pronto de que su experimento mental no probaba nada. En reflexiones posteriores, más maduras, combinó las concepciones de Newton y Leibniz en una nueva síntesis propia, estrechamente enlazada con su idealismo trascendental. Newton –decía– tenía razón al considerar el espacio como independiente de los cuerpos materiales, pero Leibniz también la tenía al negar realidad al espacio. El espacio es independiente de los cuerpos precisamente porque no es real; el espacio es ideal, subjetivo, un modo por el cual concebimos una realidad trascendente, más allá de nuestra comprensión.

Pero espacio y tiempo son como las dos lentes de unas gafas. Sin las lentes, no veríamos nada. El mundo real, el mundo externo a nuestras mentes, no es perceptible directamente; vemos únicamente lo que nos es transmitido por nuestros anteojos espacio-tiempo. El objeto *real,* lo que Kant llamaba *Ding-an-sich,* la cosa en sí, es trascendente, más allá de nuestro espacio-tiempo, completa-

mente incognoscible. ("La solución del enigma de la vida en el espacio y el tiempo está fuera del espacio y el tiempo", escribe Ludwing Wittgenstein en su *Tractatus Logico-Philosophicus*. 6. 4312.) Nosotros experimentamos sólo nuestras percepciones sensoriales: lo que vemos, oímos, tocamos, olemos, gustamos. Estas percepciones son, en cierto sentido, ilusiones. Están configuradas y coloreadas por nuestro sentido subjetivo del espacio y del tiempo, como el olor de un objeto está influido por lentes de color o la forma de una sombra depende de la superficie sobre la cual cae.

El espacio bulle en la vista; y el tiempo
canta en el oído[2].

"¿Cuál es, entonces, la solución?" –pregunta Kant en sus *Prolegómenos*–. "Estos objetos (las imágenes del espejo) no son representaciones de las cosas como son en sí mismas y como el puro entendimiento las conocería, sino que son intuiciones sensoriales, es decir, fenómenos cuya posibilidad descansa en las relaciones de ciertas *cosas en sí mismas* desconocidas con otras cosas, a saber, nuestras sensaciones."

A veces vale la pena correr el riesgo de tratar de buscar la significación de las exposiciones hechas por filósofos que vivieron hace muchas generaciones, y volver a expresar sus ideas con la terminología actual, y a la luz de los conocimientos actuales. Desde luego es una especulación.

Sin embargo, creo que si Kant viviera ahora, expresaría su punto de vista aproximadamente como sigue.

Los matemáticos del siglo XVIII, como hemos visto, no habían descubierto todavía que la geometría euclidiana se podía generalizar a cualquier número de dimensiones. Una línea recta, de un metro de longitud, es una figura de una dimensión. En dos dimensiones, la figura correspondiente es un cuadrado, de un metro de lado. En tres dimensiones, es un cubo que tiene un metro de lado. Esto puede ser generalizado añadiendo tantas nuevas dimensiones como se deseen. Un hipercubo sería un cubo, de un metro de lado, que se extiende en cuatro direcciones, cada una de ellas en ángulo recto con las otras tres. Los matemáticos pueden investigar las propiedades de semejante cubo. No hay ninguna razón para que no pueda existir un mundo de cuatro dimensiones, que contenga hipercubos materiales, o para lo que importa, un mundo de cinco dimensiones, o de seis, o de siete. La jerarquía es infinita. En cada nivel, la geometría es euclidiana, tan válida y consistente como la familiar geometría plana y del espacio que se enseñaba en el instituto.

Las técnicas matemáticas pueden revelar las propiedades de las figuras de estos espacios euclidianos de dimensión superior, pero nuestras mentes están firmemente encerradas en el espacio euclidiano de tres dimensiones, que está unido con una única flecha progrediente del tiempo. A nosotros nos parece imposible que una cosa exista sin extensión en tres dimensiones espaciales y duración en la única dimensión del tiempo. Acaso con una educación apropiada, o en alguna futura edad, cuando la mente del hombre se haya convertido en un instrumento más potente, se logre pensar en cuatro dimensiones espaciales. De momento no podemos hacerlo. Nosotros vemos el mundo a través de nuestros anteojos espacio-tiempo: una lente es el tiempo unidimensional, la otra es el espacio tridimensional. No podemos representarnos visualmente en nuestro cerebro la estructura de un hipercubo o de cualquiera otra estructura de cuatro dimensiones. Sólo podemos visualizar una estructura de tres dimensiones que permanece, que se mueve a lo largo del único carril del tiempo.

Supongamos, sin embargo, que hay un mundo trascendente, un mundo tetradimensional, inaccesible a nuestros sentidos y más allá de nuestra capacidad de imaginación. ¿Cómo vería una hiperpersona, en ese hipermundo, dos sólidos asimétricos que, como los poliedros de la figura 42, fuesen imágenes especulares uno de otro? Los matemáticos pueden dar una respuesta clara, inequívoca: ¡Los poliedros le parecerían idénticos, cada uno superponible al otro!

Para comprender esto, imagínese usted que está mirando un mundo de dos dimensiones y viendo las dos formas asimétricas de la figura 43. Los planilandeses, que viven sobre el plano, se queda-

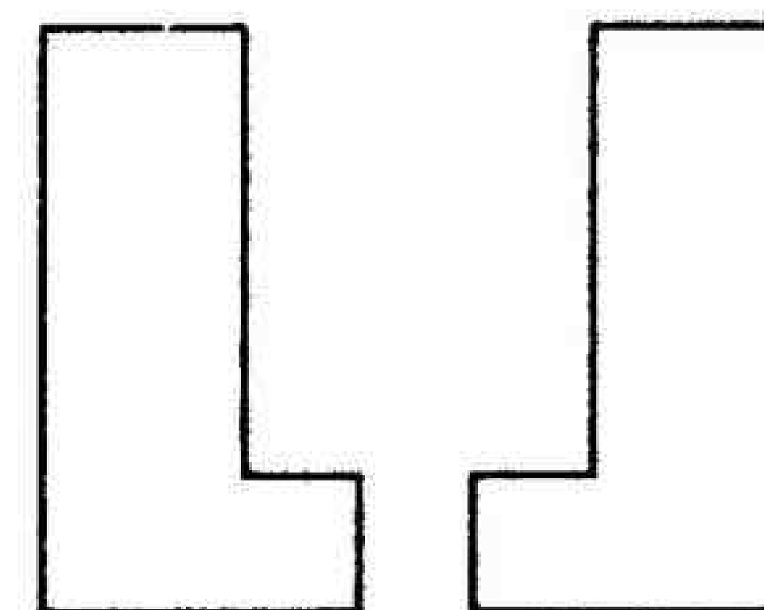


Fig. 43. Polígonos enantiomorfos.

rían tan confusos como lo estuvo Kant por sus orejas y sus reflexiones en el espejo. ¿Cómo pueden ser dos figuras tan iguales, se preguntarán los planilandeses y, sin embargo, no ser superponibles? Nosotros, que vivimos en un espacio tridimensional, podemos comprenderlo. *Son* iguales. Solamente a causa de que el pobre planilandés está encerrado en un espacio bidimensional, y ve las cosas únicamente a través de sus lentes euclidianas para dos dimensiones, es por lo que no puede ver que *son* superponibles. Nosotros podemos demostrar que lo son simplemente cogiendo una, volviéndola del revés y ajustándola, punto por punto, a la otra. Si volvemos a poner la figura vuelta del revés en el plano, muy cerca de la otra, las dos serían vistas por los planilandeses como idénticas en todos los aspectos, incluso en su lateralidad. Como los planilandeses no pueden concebir el espacio de tres dimensiones, pensarán que ha ocurrido un milagro. ¡Un objeto asimétrico rígido ha sido transformado en su imagen especular! Sin embargo, nosotros no hemos hecho nada al objeto. No lo hemos estirado, deteriorado o cambiado en absoluto. Únicamente hemos cambiado su orientación en el espacio bidimensional: su posición con respecto a los otros objetos en este espacio.

Los dos poliedros asimétricos de la figura 42 son también idénticos y superponibles. Únicamente a causa de que no podemos ver a través de anteojos trascendentes para espacio tetradimensional es por lo que creemos que no son iguales. Si pudiéramos voltear uno de ellos a través del hiperespacio –volverlo, por así decirlo, a través de una cuarta dimensión– tendríamos un par de poliedros congruentes de la misma mano.

Kant, naturalmente, no expuso estas ideas. Sin embargo, creo que si se hace un intento serio, bien informado, para situarse en el centro de la visión final de la existencia que Kant tenía, no parecería frívolo suponer que Kant podría haber razonado de este modo si tuviera a su disposición los conocimientos matemáticos del siglo XX.

Leibniz también tenía –estoy persuadido– una noción intuitiva de los espacios euclidianos de dimensión superior, entonces no descubiertos todavía. Una vez consideró la cuestión de lo que ocurriría si todo el Universo fuera súbitamente vuelto del revés, de suerte que cada cosa se transformara en su imagen especular. Leibniz concluía que no ocurriría nada. Sería absurdo decir que tal inversión había ocurrido, ya que no habría modo de detectar ese cambio. Preguntar por qué Dios ha creado el mundo de esta manera y no de otra es plantear –dice Leibniz– "una cuestión absolutamente inadmisible".

Cuando miramos esta cuestión a la luz de los diversos niveles de espacio euclidiano vemos en seguida que Leibniz tenía razón. Para invertir toda una Planilandia trazada sobre una hoja de papel, basta volver el papel y mirar las figuras desde el otro lado. Ni siquiera necesitamos volver el papel. Imagínese una Planilandia en una lámina de cristal de pie en el centro de una habitación. Cuando se mira desde un lado del cristal es un mundo a izquierdas. Si se da la vuelta en torno del cristal se ve un mundo a derechas.

EJERCICIO 11: *Cuando la Sra. López comenzó a empujar la puerta de cristales de la entrada del Banco para abrirla, quedó confusa al ver la palabra TUO escrita en la puerta, en grandes letras negras. ¿Qué significa la palabra?*

Planilandia misma no cambia en nada cuando usted la mira desde otro lado. El único cambio es la relación, en el espacio tridimensional, entre Planilandia y usted. Exactamente del mismo modo, un habitante del espacio tetradimensional podría mirar uno de nuestros sacacorchos de cocina desde un lado y ver una hélice dextrorsa, y cambiar después de posición y ver el sacacorchos desde el otro lado como una hélice sinistrorsa. Si tomase uno de nuestros sacacorchos, lo volviera del revés, y nuevamente lo pusiese en nuestro continuo nos parecería un milagro. Veríamos al sacacorchos desaparecer y después reaparecer en forma reflejada.

Los objetos enantiomorfos son idénticos no sólo en todas sus propiedades métricas, sino que también son idénticos topológicamente. Aunque un nudo a derechas en un lazo cerrado no puede ser convertido en un nudo a izquierdas, los dos son topológicamente equivalentes. Los niños muy pequeños parecen comprenderlo más rápidamente que los adultos. Jean Piaget y Bärbel Inheler, en su libro *The Child's Conception of Space* (La concepción del espacio del niño, Humanities Press, 1956), refieren, basándose en sólidas pruebas experimentales, que los niños reconocen, en realidad, las propiedades topológicas antes de aprender a reconocer las propiedades euclidianas de forma, incluso la distinción entre las formas derecha e izquierda. Cuando se les pide que copien un triángulo, por ejemplo, los niños muy pequeños suelen trazar un círculo. Los ángulos y lados del triángulo son menos perceptibles para ellos que la propiedad de ser una curva cerrada. No verán la diferencia entre los colores que se suceden en cierto orden en torno a un círculo en el sentido de las manecillas del reloj, y un círculo en el que los mis-

mos colores van en sentido contrario en el mismo orden. Sus mentes, no adiestradas, parecen sentir que los dos círculos son idénticos. No es que no se den cuenta de que uno ellos puede ser vuelto para ser igual al otro; sino, más bien, que no ven diferencia. Esto puede explicar por qué aun niños fuertemente diestros escriben a menudo letras hacia atrás, y a veces incluso palabras enteras.

Acaso nuestras mentes sean, potencialmente, más flexibles de lo que Kant suponía. Nuestra incapacidad para representarnos visualmente estructuras de cuatro dimensiones, tales como un hipercubo, puede deberse solamente al hecho de que todos nuestros recuerdos proceden de experiencias en un mundo tridimensional. ¿Puede un niño aprender a pensar en figuras de cuatro dimensiones con juguetes adecuadamente instructivos? La cuestión ha sido discutida seriamente por algunos matemáticos, y desde luego es un truco corriente de la ciencia-ficción, sobre todo en el cuento de Lewis Paget *Mimsy Were the Borogoves*, que figura en muchas antologías.

¿Hay formas especulares entre los hipersólidos de cuatro dimensiones, esto es, formas idénticas en todos los aspectos excepto en su lateralidad? Sí, esta dualidad existe en todos los niveles. En una dimensión, las figuras son reflejadas en el espejo por un punto; en dos dimensiones, por una recta. En tres dimensiones, por un plano. En cuatro dimensiones, por un sólido. Y así sucesivamente para los espacios de más dimensiones. En todo el espacio de *n* dimensiones, el "espejo" es una "superficie" de $n-1$ dimensiones. En todo espacio de *n* dimensiones, a una figura asimétrica puede hacérsela coincidir con su imagen haciéndola girar en un espacio de $n+1$ dimensiones. Acaso nuestro imaginario Kant del siglo XX dijera así: Únicamente la "pura" inteligencia de Dios, que está fuera del espacio y el tiempo, vería todos los pares de estructuras enantiomorfas, en todos los espacios, como idénticas y superponibles.

H. G. Wells fue el primero en basar una historia de ciencia-ficción sobre la inversión de una estructura sólida asimétrica haciéndola girar en un espacio de cuatro dimensiones. En *The Plattner Story*, uno de los mejores cuentos breves de Wells, un joven profesor de química llamado Gottfried Plattner hace explotar un misterioso polvo verde que le transporta directamente al mundo de las cuatro dimensiones. Lo que ve durante los nueve días que vive en el oscuro "Otro-Mundo", con su gran sol verde y sus espantosos habitantes, tendrá usted que descubrirlo por sí mismo leyendo la fábula de Wells. (Se la puede encontrar en una colección titulada *28 Science Fiction Stories*, por H. G. Wells, Dover, 1952.) Después de

nueve días en el espacio tetradimensional, Plattner resbala en una roca, la botella de pólvora verde estalla en su bolsillo y es devuelto al espacio de tres dimensiones. Pero su cuerpo ha sido vuelto del revés. Ahora su corazón está a la derecha. Y escribe a la inversa, con su mano izquierda[3].

Las mudas figuras, a la deriva en el espacio tetradimensional de Wells, son las almas que habían vivido en la Tierra. Esta idea que hacía a las almas habitar en un espacio de dimensión mayor era corriente en los círculos espiritistas de la época de Wells; de cuando en cuando se pedía, en efecto, a los *mediums* que transformaran un objeto asimétrico en su imagen especular, en prueba de que estaban en auténtico contacto con los habitantes del espacio de cuatro dimensiones. Henry Slade, un habilidoso *medium* americano, famoso a fines del siglo XIX, hacía creer que entre sus facultades estaba el poder de trasladar objetos dentro y fuera del espacio tetradimensional durante sus sesiones. Uno de sus trucos favoritos era producir nudos en un lazo cerrado de cuerda sin nudos, un hecho que (aparte de la trampa) podía ser explicado únicamente suponiendo que parte de la cuerda se había hecho pasar a través de un espacio de dimensión superior. Un astronómo alemán, Johann Carl Friedrich Zöllner, tipo notablemente estúpido, increíblemente ignorante de los métodos de los prestidigitadores, se rindió por completo a la magia elemental de Slade. Zöllner escribió, sin intención, un libro hilarante titulado *Trascendental Physics*, en el que defendía las proezas de Slade contra la acusación de fraude[4].

Para obtener una prueba definitiva e irrefutable de que Slade estaba en contacto con los espíritus en el espacio de cuatro dimensiones, Zöllner propuso una vez al *medium* que invirtiera un poco de ácido dextrotartárico, de modo que hiciera girar el plano de polarización de la luz a la izquierda, en vez de a la derecha. También presentó a Slade varias conchas de caracol, cuyas hélices cónicas giraban a la derecha o a la izquierda, para ver si Slade podía convertirlas en su imagen especular. Eso seguramente habría sido tan sencillo como hacer un nudo pasando una parte de la cuerda a través del espacio de cuatro dimensiones, pero desde el punto de vista de un prestidigitador presentaba dificultades. Slade habría tenido que obtener algún ácido levotartárico que pudiera sintetizarse únicamente en un laboratorio, cosa difícil de conseguir, pero aún le habría sido más difícil encontrar conchas que fueran el exacto duplicado, si bien de mano opuesta, de las que le habían sido dadas. Como se podía esperar, ninguno de estos experimentos cruciales tuvo éxi-

to. Naturalmente, esto no hizo la menor mella en la dura corteza de la fe de Zöllner.

¿Es posible que algún día la ciencia encuentre la prueba de que un espacio de más de tres dimensiones es algo más que una abstracción matemática, o una disparatada especulación de espiritistas y ocultistas? Quizás, aunque hasta el presente no hay más que intentos estériles. El continuo de cuatro dimensiones de la relatividad es un continuo de tres dimensiones combinado con el tiempo y tratado matemáticamente como una geometría no euclidiana de cuatro dimensiones. No es, en absoluto, lo mismo que un espacio tetradimensional compuesto de cuatro coordenadas espaciales.

Por otra parte, se han ideado varios modelos cosmológicos en los cuales el espacio tridimensional se curva a través de un espacio tetradimensional, en una forma que, en principio, puede ser puesta a prueba. Por ejemplo, Einstein propuso un modelo cósmico en el cual un astronauta podía partir en cualquier dirección, y si viajaba bastante lejos, en la línea más recta posible, retornaría al punto de partida. En este modelo, nuestro mundo de tres dimensiones es tratado como la hipersuperficie de una enorme hiperesfera. Andar a su alrededor sería comparable al viaje de un planilandés alrededor de la superficie de una esfera.

En otros modelos cósmicos la hipersuperficie gira a través del espacio tridimensional de manera análoga a la de superficies bidimensionales como la botella de Klein y el plano proyectivo. Son éstas superficies cerradas con una sola cara, sin borde, que giran sobre sí mismas en forma similar a como gira una cinta de Moebius. Por ejemplo, si se supone que cada punto de una esfera está unido al punto diametralmente opuesto (esto usted no lo puede imaginar, ha de ser tratado matemáticamente), se tiene un modelo de lo que los topólogos llaman "espacio proyectivo tridimensional". Un astronauta que hiciera un viaje de ida y vuelta a través de ese espacio volvería en forma reflejada, como Plattner en la novela de H. G. Wells.

Para comprender cómo el astronauta quedaría vuelto del revés, es instructivo el siguiente experimento. Corte usted dos tiras de papel exactamente iguales y ponga una sobre la otra; después (manejándolas como una sola tira) déle una media torsión y junte los extremos en la forma que aparece en la figura 44. El modelo que se ha formado no es la cinta de Moebius corriente, pero sí lo es el espacio comprendido *entre* las dos tiras[5]. El papel puede ser concebido como una envoltura para una superficie de Moebius de espesor

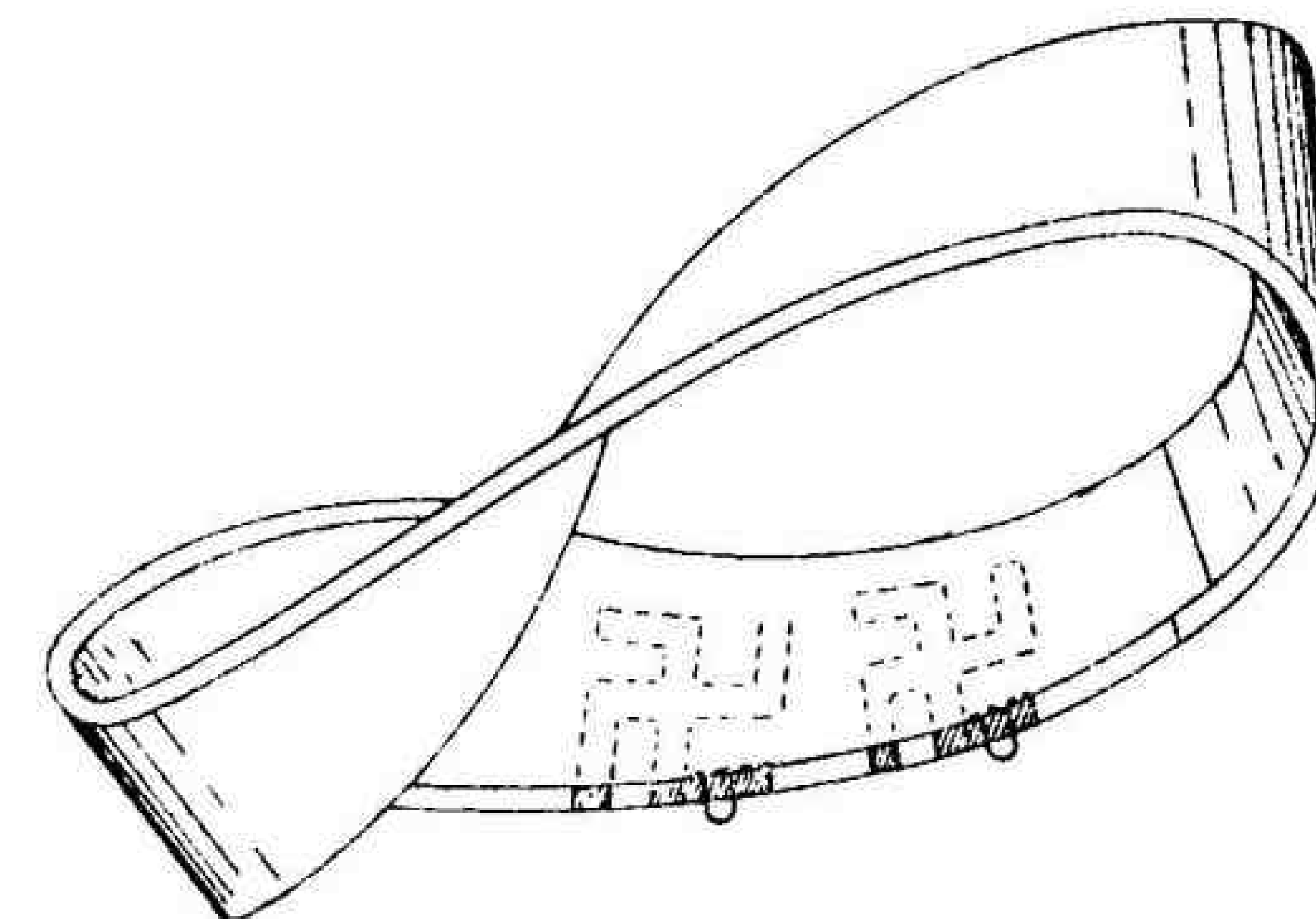


Fig. 44. Un experimento con una doble cinta de Moebius.

cero. Corte ahora dos pequeñas esvásticas en un trozo de papel oscuro, y coloque ambas figuras dentro de la doble cinta de Moebius, sosteniéndolas con clips sujetapapeles. Las dos esvásticas deben ponerse una al lado de la otra, orientadas en la misma dirección. Quite el clip de una y deslícela una vez por la superficie de Moebius, deslizándola entre las "dos" tiras hasta que vuelva a donde estaba originariamente.



Fig. 45. Modelo de una botella de Klein.

Examine las dos esvásticas y verá en seguida que la figura que hizo el viaje completo ha cambiado de orientación. Las dos esvásticas ya no son superponibles. Naturalmente, si usted desliza la figura una vez más, recobrará la orientación anterior. Este mismo tipo de inversión es el que experimentaría una astronauta en el espacio de tres dimensiones si hiciera un viaje circular alrededor del Cosmos que figurase a través del espacio tetradimensional en forma análoga a la torsión de una superficie de Moebius.

EJERCICIO 12: *La figura 45 es un dibujo de una botella de Klein: una superficie de una cara, sin aristas. Si un planilandés asimétrico viviera en esta superficie (recuérdese que se le debe concebir con un espesor cero), ¿le sería posible hacer un viaje alrededor de su Cosmos de tal manera que regresase en una forma invertida respecto a su entorno?*

18. El problema de Ozma

En las cuestiones científicas controvertidas, para las que escasean los datos empíricos, la opinión científica a veces va atrás y adelante, como las modas cambiantes de los trajes femeninos. La falda es larga en una década, corta en la siguiente y después vuelve a alargarse otra vez. Cuando yo iba a la universidad, la moda entre los astrónomos era pensar que los planetas son sumamente raros en el Universo, con arreglo a la teoría de que la Tierra era resultado de una colisión improbable o de un próximo acercamiento de dos soles. Se creía muy posible que la vida en el Cosmos estuviera circunscrita a nuestro sistema solar, acaso sólo a la Tierra. Hoy la opinión informada se inclina en otra dirección. Los astrónomos sospechan ahora que los planetas son extraordinariamente usuales en el Universo. Acaso haya miles de millones sólo en nuestra galaxia, de los cuales millones pueden albergar vida inteligente. Si es así, parece probable que los habitantes de algunos de esos planetas, con un conocimiento científico igual o más avanzado que el nuestro, puedan estar tratando de comunicarse con otros planetas.

Sobre esta hipótesis se inició en 1960 el Proyecto Ozma. Un potente radiotelescopio instalado en Green Bank (Virginia Oeste) fue apuntado hacia varios soles de la galaxia, en una busca sistemática de mensajes de radio procedentes de algún otro mundo. Frank D. Drake, el radioastrónomo que dirigía el proyecto, era un admirador, desde mucho tiempo atrás, de L. Frank Baum y sus libros Oz. Por eso llamó Ozma al proyecto, dándole el nombre de Ozma, el gobernante de la utopía mítica de Baum. Es un nombre apropiado. La localización de Ozma es desconocida. Sus habitantes son "humanoides", pero no necesariamente gente de carne y hueso como nosotros (recuérdense el Leñador de hojalata y el Espantajo). Además,

Oz está rodeado por todas partes del impracticable Desierto de la Muerte, que destruye a cualquiera que toque un grano de sus arenas. Uno de los personajes de Baum, el Gnomo Rey, tiene un servidor llamado Oidor Orejudo. Las orejas de éste tienen varios pies de ancho. Si se pone una de ellas sobre el suelo se puede oír sonidos a miles de kilómetros de distancia. El radiotelescopio de Frank Drake era su Oidor Orejudo. Drake escuchó pacientemente, en espera de algún tipo de señal codificada, acaso la repetición de una simple sucesión de números, que únicamente pudiera proceder de una fuente inteligente, que comprendiera las leyes universales de la matemática. ¡La esperanza de oír semejante señal era verdaderamente propia del mundo de Oz! Es difícil calcular la conmoción que tal señal provocaría en nuestra manera egocéntrica, terráquea, de pensar.

¿Qué haríamos si escuchásemos esa señal? El físico Chen Ning Yang (del que hablaremos más adelante) ha hecho una sugerencia: no responder. Tal reacción parece improbable. Ya los matemáticos y los lógicos tratan de elaborar procedimientos por los cuales dos planetas podrían construir lentamente un lenguaje común para hablar entre sí. En 1962 Hans Freudenthal, un matemático holandés, publicó la primera parte de una ambiciosa obra titulada *Lincos: Design of a Language Cosmic Intercourse* (Lincos: Proyecto de un lenguaje para la comunicación cósmica). No hay duda de que las pulsaciones codificadas pueden servir para la comunicación fluida. Si se lograra un contacto, sería muy sencillo transmitir figuras detalladas. En la forma más rudimentaria únicamente se necesitaría dividir un rectángulo en miles de pequeñas unidades cuadradas, como una hoja de papel cuadriculado, y transmitir entonces un código binario de unos y ceros indicando, por ejemplo, cuáles de los cuadrados –numerándolos de arriba a abajo y de izquierda a derecha– deben ser marcados. Figuras mejores, tal vez incluso imágenes móviles de televisión, podrían ser transmitidas más tarde gracias a haces de barrido, como en televisión. Los largos intervalos de tiempo (una señal de radio tarda casi cuatro años en llegar a la estrella más cercana a la Tierra) introducen complicaciones, pero nadie duda de que sería sólo una cuestión de tiempo conseguir que los dos planetas tuviesen entre sí una comunicación tan fácil, o casi tan fácil, como entre dos naciones en la Tierra que hablen lenguajes diferentes.

¿Se dio cuenta el lector del uso de la frase "de izquierda a derecha" al describir cómo ha de ser numerado el rectángulo? A menos que los habitantes del distante planeta –le llamaremos el planeta X para abreviar– numeren su rectángulo de izquierda a derecha, pro-

ducirán una figura que será imagen especular de la que intentamos transmitir. ¿Cómo hacerles entender lo que queremos decir con la frase "de izquierda a derecha"?

Supongamos que hemos establecido ya comunicación fluida con el planeta X por medio de un lenguaje como el Lincos gracias al uso de figuras. Les hemos pedido que numeren los cuadraditos del rectángulo "de arriba a abajo" y "de izquierda a derecha". No hay posibilidad de interpretar erróneamente lo que queremos decir por "arriba a abajo". "Arriba" es la dirección que se aleja del centro de un planeta; "abajo" es la dirección hacia el centro del planeta. Con "delante" y "detrás" tampoco hay problema. Pero después de haber establecido el significado de arriba y abajo, delante y detrás, ¿cómo explicar lo que entendemos por izquierda y derecha? ¿Cómo podemos estar seguros, cuando transmitimos una figura, por ejemplo, lo que llamamos una hélice dextrorsa, de que ellos reciben la figura de una hélice de la misma torsión? Si toman la frase "de izquierda a derecha" en el mismo sentido en que nosotros la empleamos, las figuras serán iguales, pero si lo hacen en sentido contrario, nuestra figura de una hélice dextrorsa será reproducida en el planeta X como una hélice a izquierdas. En suma, ¿cómo podemos comunicar al planeta X nuestro significado de izquierda y derecha?

Es una cuestión embrollada. Aunque se trate de un viejo problema, todavía no se le ha dado nombre[1]. Yo propongo llamarle el "problema de Ozma". Enunciado con precisión, ¿hay un modo de comunicar la significación de "izquierda" mediante un lenguaje transmitido en forma de señales pulsátiles? De acuerdo con el enunciado del problema, podemos decir a nuestros interlocutores lo que queramos, y también pedirles que realicen un experimento determinado, pero con una condición: *No puede haber ningún objeto o estructura asimétricos que nosotros y ellos podamos observar conjuntamente.*

Sin esta condición no hay problema. Por ejemplo, si enviáramos al planeta X un cohete que llevase la figura de un hombre con las inscripciones "arriba", "abajo", "izquierda", "derecha", la figura transmitiría inmediatamente nuestra significación de "izquierda". También podríamos transmitir un haz de radio al que se le hubiera dado una torsión helicoidal mediante polarización circular. Si los habitantes del planeta X hubieran construido antenas capaces de determinar si la polarización era en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario, podría establecerse fácilmente una compren-

sión común de "izquierda". También podríamos pedirles que enfocasen un telescopio hacia una determinada configuración asimétrica de estrellas y emplear el dibujo estelar para definir izquierda y derecha. Sin embargo, todos estos métodos violan la condición de que no debe haber observación común de un objeto o estructura particular asimétrica.

¿Es posible transmitir instrucciones para trazar algún tipo de dibujo geométrico que nos permitiera explicarles lo que entendemos por "izquierda"? Después de reflexionar un momento, usted puede convencerse fácilmente de que la respuesta es "no". Todo dibujo asimétrico tiene dos formas, de mano derecha y mano izquierda. Hasta que nosotros y el planeta X no tengamos una comprensión común de derecha e izquierda no hay modo de aclarar en cuál de las dos formas pensamos. Podemos, por ejemplo, pedirles que dibujen la figura de una esvástica nazi y definir la derecha como la dirección hacia la cual el brazo superior de la esvástica apunta. Desgraciadamente no tenemos modo de decirles lo que entendemos por una esvástica nazi. La esvástica puede girar en la otra dirección. Hasta que nos pongamos de acuerdo sobre derecha e izquierda no podemos dar instrucciones inequívocas para dibujar la esvástica correctamente.

Acaso el campo de la química facilitaría un método para definir la derecha y la izquierda. ¿Podemos explicar al planeta X cómo identificar un cristal, como los de cuarzo o cinabrio, que hace girar la luz polarizada en cierta dirección? Sí; pero incluso si encontrasen uno de tales cristales en su planeta la muestra no serviría de nada. Como hemos visto en el capítulo 11, un cristal ópticamente activo puede ser de cualquiera de las dos manos. Sin la noción previa de izquierda y derecha, no habría manera de reconocer la "mano" de una muestra particular de cristal que ellos pudieran encontrar o formar en sus laboratorios.

La misma ambigüedad se aplica a todos los estereoisómeros ópticamente activos. Todo compuesto químico capaz de hacer girar la luz polarizada –esto es, todo compuesto con átomos dispuestos asimétricamente en la molécula– tiene las dos formas, derecha e izquierda. Podríamos llegar fácilmente a un acuerdo con el planeta X sobre lo que queremos decir por una forma asimétrica de ácido tartárico, pero si lograsen encontrarla y sintetizarla no sabríamos si la han obtenido en la forma derecha o en la izquierda.

¿Qué hay sobre la asimetría de los compuestos de carbono en los tejidos vivos? Hemos visto en un capítulo anterior que todos los

aminoácidos en los organismos que viven en la Tierra son levógiros y todas las hélices de proteínas y ácidos nucleicos son dextrógiras. Si los habitantes del planeta X están formados por compuestos de carbono, acaso contengan también hélices de proteína y ácido nucleico y, naturalmente, si tienen proteína también tienen aminoácidos. ¿No podríamos definir derecha e izquierda en términos de la estructura de esos compuestos asimétricos de carbono? No; no podemos. Como hemos visto, es completamente accidental que nuestros compuestos de carbono tengan su "mano" particular. Por lo que conocemos hasta ahora, no hay razón para que todo compuesto de carbono en todos los seres vivientes de la Tierra no pudiera, si la evolución hubiera tomado otro giro al comienzo, ir en la otra dirección. Sin una previa comprensión de izquierda y derecha no podríamos saber si los aminoácidos de *ellos* son de la mano derecha o de la izquierda.

Supongamos que su planeta, como la Tierra, gire sobre su eje. ¿Hay algún modo de que esta rotación sirva de base para definir la izquierda? El sentido de la rotación de la Tierra puede ser mostrado mediante un gran peso suspendido de un largo alambre delgado, que oscile lentamente atrás y adelante. El aparato es conocido como péndulo de Foucault, porque el físico francés Jean Bernard Leon Foucault fue el primero que hizo este experimento, en París, el año 1851. La inercia del péndulo oscilante mantiene constante la dirección de su oscilación en relación con las estrellas, mientras el planeta gira bajo él. En el hemisferio Norte, un péndulo de Foucault gira en sentido contrario a las manecillas del reloj; en el hemisferio Sur, en la otra dirección. Pero ¿cómo podemos explicar al planeta X lo que nosotros entendemos por hemisferios Norte y Sur? No podríamos decir: Situaos en vuestro Ecuador, frente a la dirección en que vuestro planeta gira, y el hemisferio Norte estará a vuestra izquierda. Esto presupone saber cuál es la izquierda. A menos que explicásemos al planeta cuál es cada hemisferio, el péndulo de Foucault no serviría de nada. Lo mismo sucede con respecto a varios fenómenos asimétricos que son resultado de las fuerzas Coriolis de un planeta. No podemos decir: disparad un misil desde el Ecuador hacia el Polo Norte y lo veréis desviarse en la dirección que nosotros llamamos "derecha". Tal declaración sería ambigua si antes no hubiéramos llegado a un acuerdo sobre cuál es el Polo Norte, lo que no podríamos decir sin un acuerdo sobre lo que entendemos por "derecha" e "izquierda".

Acaso el planeta X tenga un campo magnético con polos Norte

y Sur que coinciden con los polos del eje de rotación del planeta. ¿Nos ayudaría esto? No. En primer lugar, no conocemos todavía la causa de que un planeta tenga campo magnético. Se presume que tiene alguna relación con la rotación del planeta, pero no podemos decir con seguridad que lo que llamamos polo norte magnético esté siempre asociado con el extremo del eje de rotación que se halla a la izquierda cuando se está frente a la dirección de la rotación. Podría estar a la derecha. El Sol gira siempre en la misma dirección, pero, como vimos en el capítulo 6, de cuando en cuando los polos magnéticos del Sol sufren una peculiar inversión: el polo norte se convierte en el polo sur, y viceversa. La Luna, que gira lentamente (una rotación por cada revolución alrededor de la Tierra), parece que *no* tiene polos magnéticos. Actualmente no tenemos razones para conjeturar cómo estarían colocados los polos magnéticos del planeta X respecto a la dirección de la rotación del planeta. Aun en el caso de que lo supiéramos, no nos serviría para definir la derecha y la izquierda, como veremos en el capítulo siguiente.

Queda una posibilidad: los fenómenos asimétricos asociados con las fuerzas eléctricas y magnéticas. Veamos el ejemplo más conocido: las líneas magnéticas de fuerza que rodean una corriente van alrededor de la corriente en sentido contrario al de las agujas del reloj, si usted se coloca frente a la dirección en que va la corriente. En el siglo XIX, cuando se creía que la corriente iba, a través de un alambre, del polo positivo al negativo de una pila, esta asimetría fue expresada por lo que los físicos llamaban "regla de la mano derecha". Si usted toma un alambre con la mano derecha, apuntando con su pulgar a lo largo del alambre, del polo positivo al negativo, sus dedos se enroscarían en el alambre en la dirección de las líneas magnéticas de fuerza. Hoy sabemos que la corriente sigue la dirección contraria. El movimiento de los electrones libres, que constituyen la corriente eléctrica, va del polo negativo de una pila al positivo. En este libro adoptaremos la norma de los físicos, que prefieren una "regla de la mano izquierda".

¿Qué quiere decir exactamente un físico cuando dice que si usted enrosca los dedos de su mano izquierda alrededor de un alambre con el pulgar apuntando en dirección al flujo de la corriente, los dedos señalarán en la dirección del campo magnético de la corriente? Significa que si usted coloca una aguja imantada cerca del alambre, el polo norte de la aguja apuntará siempre en una dirección contraria a las agujas del reloj en torno al alambre cuando usted está frente a la dirección de la corriente. La figura 46 muestra

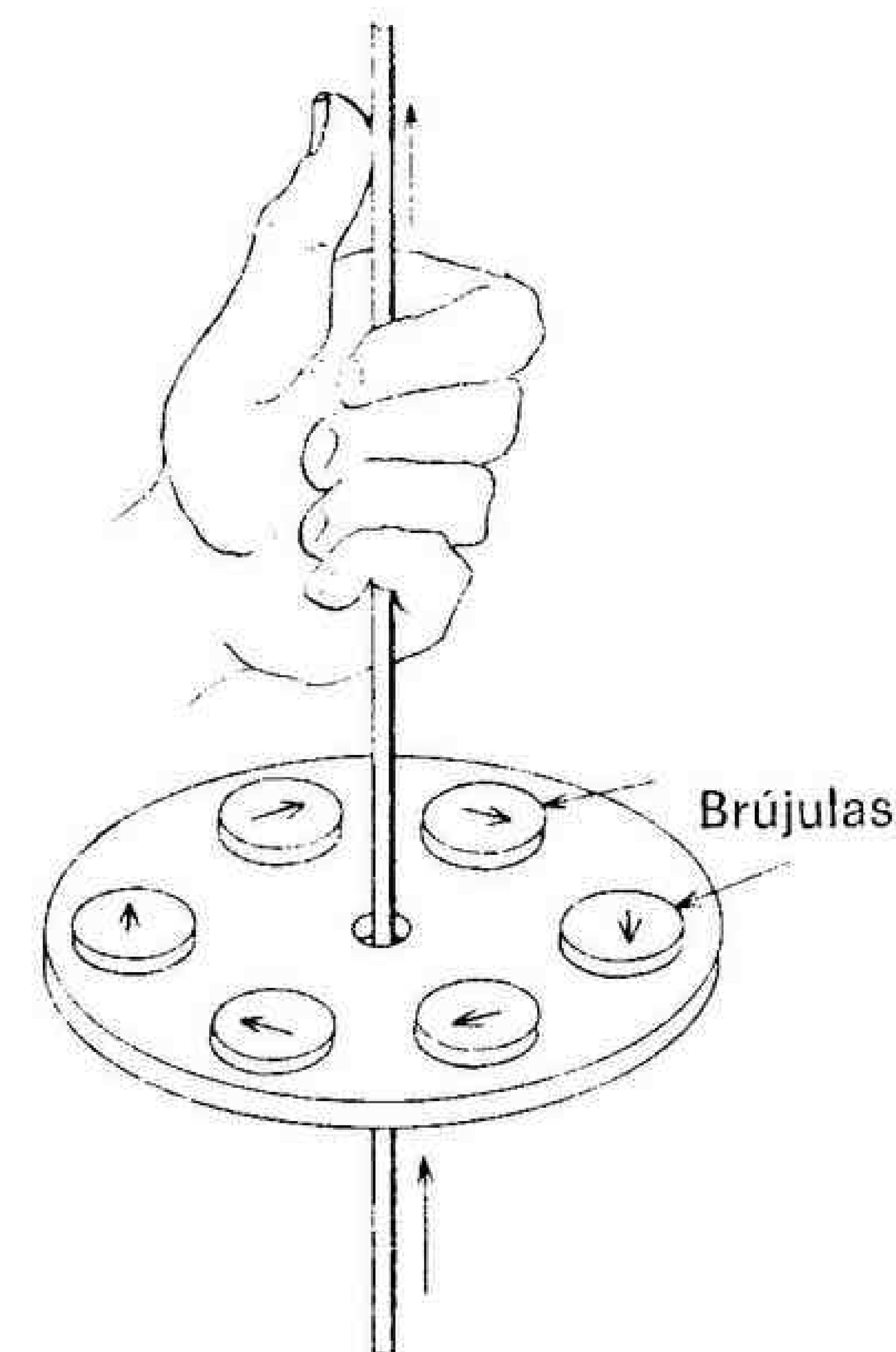


Fig. 46. Regla de la mano izquierda para determinar la dirección de un campo magnético que rodea a una corriente eléctrica.

cómo se comporta una aguja imantada cuando se la pone en diversas posiciones alrededor de un alambre por el que pasa una corriente en la dirección de la flecha.

Éste es un ejemplo sencillo y sorprendente de asimetría. Podríamos explicar a los habitantes del planeta X, de una manera exacta, cómo se hace una pila mezclando ciertos productos químicos e introduciendo metales en el líquido para producir los polos positivo y negativo. Una vez que nosotros y el planeta X estemos de acuerdo sobre la dirección de la corriente a lo largo del alambre (no hay dificultad en convenirlo), ¿no podríamos decir entonces: poned una aguja imantada sobre el alambre, situaos frente a la dirección en que pasa la corriente, y el extremo norte de la aguja señalará en la dirección que en la Tierra llamamos "izquierda"?

Aquí tenemos seguramente un sencillo experimento que proporciona una definición operacional clara, inequívoca, de derecha e izquierda. ¿No?

No. El experimento resultaría si tuviéramos alguna manera inequívoca de decir al planeta X qué extremo de la aguja es el extremo que nosotros llamamos "norte". ¡Ay, no hay modo de comunicar esta información sin tener primero una comprensión común de izquierda y derecha! Para comprender por qué es así tenemos que comprender primero los fundamentos de la teoría moderna del magnetismo. Éste será el tema del capítulo siguiente.

19. La sorpresa de Mach

Imagínese un alambre que pasa en dirección norte-sur por debajo de una brújula (figura 47, izquierda). La aguja de la brújula es paralela al alambre y señala al norte. Entonces se envía a través del hilo una corriente eléctrica de sur a norte. La aguja inmediatamente oscila en dirección contraria a las agujas del reloj y señala al oeste (figura 47, derecha). Si se invierte la dirección de la corriente, la aguja da media vuelta y señala al este.

Los físicos del siglo XIX suponían que esto indicaba algún tipo de misteriosa asimetría en las leyes de la naturaleza. El experimento no era superponible a su imagen especular porque en la reflexión del experimento el extremo norte de la aguja de la brújula señalaría en dirección errónea. El gran físico alemán Ernst Mach, en su clásica obra *Science of Mechanics,* subraya el "choque intelectual" que le produjo este sencillo experimento[1]. "Nos enseña –dijo– una lección

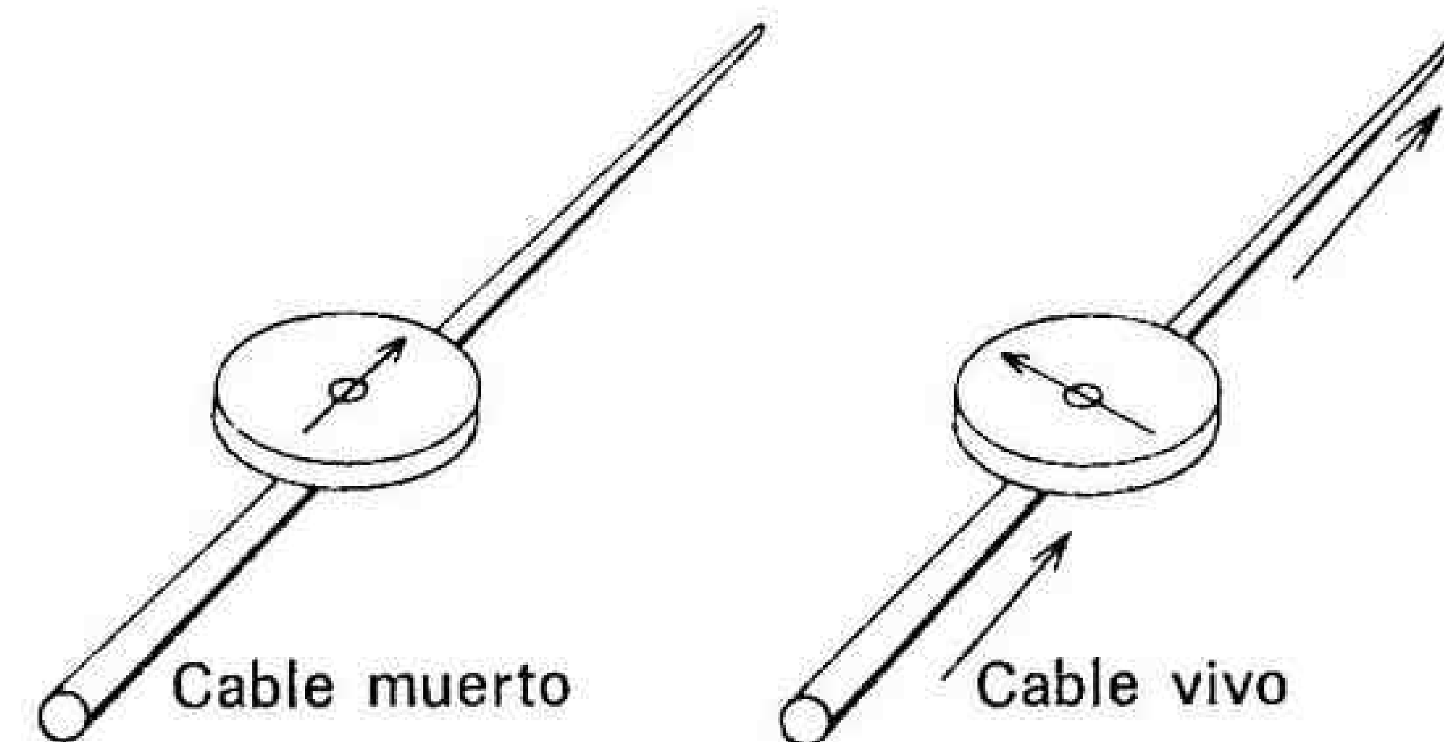


Fig. 47. El experimento que impresionó a Mach.

importante. Debemos recelar siempre de nuestras intuiciones cuando tratamos de conjeturar por adelantado cómo se comportará la naturaleza."

Un hombre dijo al Universo:
"Señor, yo existo."
"Sin embargo –replicó el Universo–,
el hecho no ha creado en mí
un sentido de obligación"[2].

El Universo no está sometido a la obligación de adaptarse a los deseos o conjeturas intuitivas de ningún científico. En el experimento de la brújula, nuestra intuición nos lleva a esperar que los campos eléctrico y magnético, como los campos simétricos de otras fuerzas físicas, no mostrarán preferencia por la derecha o la izquierda. Sin embargo, algún tipo de torsión asimétrica parece tener un papel esencial en el experimento de la brújula y el alambre.

¿No nos proporcionará esta torsión una sencilla base para definir la derecha y la izquierda y, por tanto, para resolver el problema de Ozma? Nosotros únicamente podemos pedir a nuestros amigos del planeta X que reproduzcan el experimento, conviniendo en llamar "izquierda" a la dirección en que señala la aguja de la brújula cuando la corriente que pasa por debajo de ella se aleja de nosotros. ¿En qué falla este procedimiento?

El fallo estriba en nuestra curiosa incapacidad para comunicar al planeta X cuál es el polo de la aguja que ha de ser llamado "norte". Si todos los polos nortes de los imanes fueran rojos y los polos sur verdes no habría dificultad. Podríamos decir al planeta X que el polo norte es el rojo. Desgraciadamente ninguna inspección o probatura de un imán revela la más ligera diferencia entre los dos polos. Sus fuerzas son exactamente las mismas. Si se pule la superficie de una barra imantada y se la recubre con un líquido que contiene polvo de hierro, las partículas de hierro forman dibujos de "dominios" sobre el imán (en seguida explicaremos lo que son "dominios") que pueden ser vistos con un microscopio. Pero los dibujos no muestran preferencia hacia ninguno de los extremos del imán; no dan una clave para distinguir entre los dos polos. De cuando en cuando, en los últimos cincuenta años, un físico ha creído descubrir una característica intrínseca que permita diferenciar un polo de otro sin probar los polos en otros campos magnéticos. Algunos artículos relatando tales "descubrimientos" han sido publi-

cados en las revistas de física. Siempre resultó que el físico estaba equivocado.

El polo norte de la aguja de una brújula suele estar pintado de negro para distinguirlo del polo sur. ¿Cómo se las arregla un fabricante de brújulas para saber qué extremo ha de pintar de negro? Probándolo con otros imanes. El polo norte es el extremo que es repelido por el polo norte de otro imán. ¿Cómo reconoce los polos nortes de otros imanes? Son los extremos que son repelidos por los polos nortes de otros imanes. La base para la definición de "polo norte" es el campo magnético de la Tierra misma. El polo norte de un imán es el polo atraído por el polo norte magnético de la Tierra.

Es algo confuso, a causa de que los polos iguales se repelen entre sí. Hablando estrictamente, el polo norte magnético de la Tierra es su polo sur. Pero se usa la convención de que el polo sur magnético de la Tierra, por estar muy próximo del Polo Norte geográfico de la Tierra, es llamado "polo norte magnético". El punto importante es que no tenemos manera de decir al planeta X qué extremo de una aguja imantada es el que llamamos "norte", a causa de que no hay modo de decirle qué extremo del eje de rotación de la Tierra es el extremo "norte".

Si enrollamos un alambre alrededor de un núcleo de hierro o acero y hacemos pasar una corriente por el alambre, el núcleo se convierte en un electroimán. Es posible enrollar el alambre de forma que el polo norte del electroimán pueda quedar a uno u otro lado del núcleo. ¿Podemos transmitir al planeta X instrucciones sobre cómo hacer un electroimán que pudiera ser empleado para establecer una definición inequívoca del polo norte de un imán?

Los lectores que conocen la física elemental negarán en seguida con la cabeza. El alambre enrollado alrededor del núcleo de un electroimán forma una espiral, a derechas o a izquierdas. Si la corriente pasa alrededor del núcleo de hierro por una espiral dextrorsa viajará hacia el polo sur del núcleo (véase figura 48). Si pasa por una espiral levotrorsa, entonces se dirigirá al polo norte del núcleo. Incluso sin núcleo, el alambre espiral tiene una campo magnético con extremos norte y sur. En ambos casos la regla de la mano izquierda determina qué extremo es el norte o el sur. Si usted pone su mano izquierda sobre la espiral con los dedos curvados en dirección de la corriente que pasa por la bobina, su pulgar señalará hacia el polo norte del campo producido por la espiral. Está claro que no podremos explicar al planeta X qué extremo de un electroimán es el norte hasta que podamos explicarle lo que entendemos por una

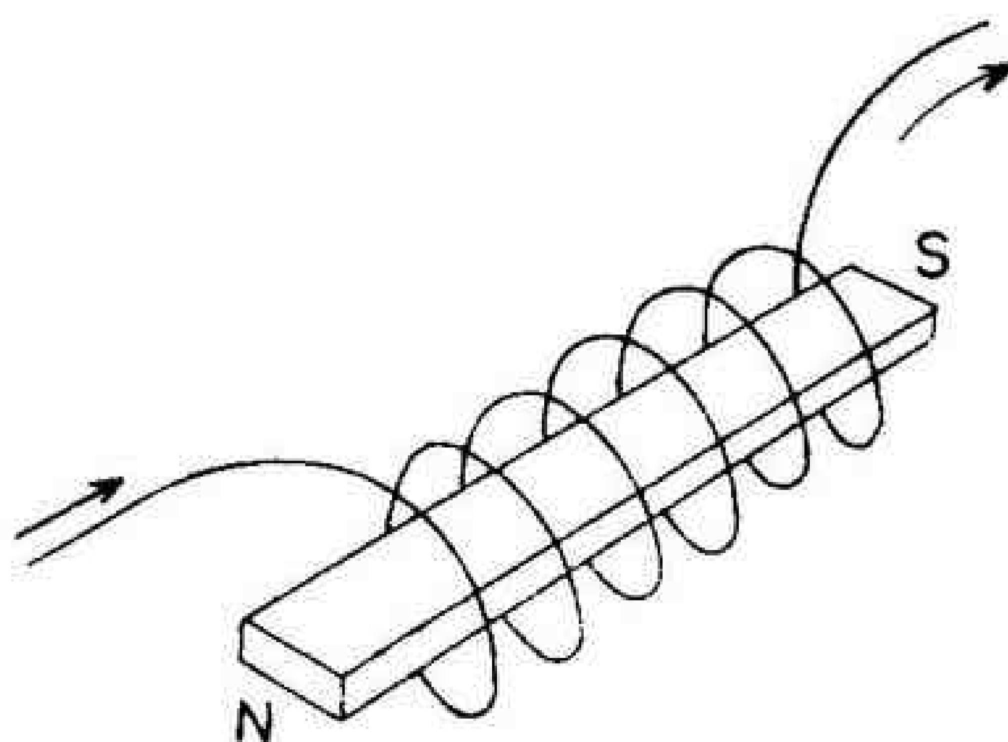


Fig. 48. Un electroimán.

espiral dextrorsa. Y esto no puede hacerse sin una noción previa de izquierda y derecha.

"Amateur in Chancery", de George O. Smith (*Galaxy,* octubre de 1961, reimpreso en la antología de Frederick Pohl *The Expert-Dreamer,* Doubleday, 1962), es un relato de ciencia-ficción basado en la dificultad de comunicar a un habitante de Venus lo que entendemos por izquierda y derecha. En ella alguien sugiere el siguiente procedimiento:

"Enróllese nuestro electroimán de esta manera: Ponemos la barra de hierro horizontalmente frente a nosotros. El alambre, partiendo de donde estamos nosotros, pasa sobre el extremo superior de la barra, baja hasta el extremo inferior, se dirige hacia nosotros por la cara inferior y sigue dando vueltas de esta manera hasta que nuestro electroimán queda enrollado."

Hay dos maneras de seguir estas instrucciones. Si el alambre es enrollado con la mano derecha, formará una espiral levotrorsa en torno a la barra de acero. Si lo enrollamos con la mano izquierda, formará una espiral dextrorsa. En *ambos casos,* si la corriente entra por el extremo por donde comenzamos a enrollarlo, la aplicación de la regla de la mano izquierda muestra que el polo norte del electroimán quedaría a la derecha. La dirección de la corriente *puede* ser comunicada.

EJERCICIO 13: *Explique por qué este procedimiento no comunicará la significación de derecha e izquierda.*

Una ambigüedad similar de derecha-izquierda interviene en todos los fenómenos asimétricos relacionados con el magnetismo y la electricidad. Lo mismo que las cargas eléctricas en movimiento (las corrientes) crean campos en los cuales los imanes se orientan asimétricamente, los imanes crean campos en los cuales las corrientes tienden a comportarse de un modo asimétrico semejante. Un experimento muy conocido consiste en hacer dar vueltas a un alambre vertical, con un extremo sumergido en mercurio, en torno al polo de un imán, ya en la dirección de las manecillas del reloj, ya en la contraria. El mismo principio rige un tipo primitivo de motor conocido como "rueda de Barlow". En todos esos fenómenos la dirección de la rotación depende de qué polo del imán se emplee. No podemos utilizar estas rotaciones para comunicar la significación de derecha e izquierda al planeta X, porque no podemos decirle cómo distinguir el polo norte de un imán del polo sur.

Parecidas ambigüedades rodean a los movimientos asimétricos de las partículas cargadas eléctricamente en los campos magnéticos. Una partícula cargada que adquiere una trayectoria helicoidal dextrorsa en un campo magnético seguirá una trayectoria helicoidal a izquierdas si se invierten los polos del campo. Ningún experimento con cargas eléctricas puede suministrar una definición inequívoca de derecha e izquierda. En algún momento del experimento hay que introducir una distinción entre derecha e izquierda o una distinción entre los polos sur y norte magnéticos, que a su vez descansa sobre una distinción entre izquierda y derecha.

Los físicos suelen exponerlo de esta manera: La diferencia entre los polos norte y sur de un campo magnético es una *convención.* Sabemos que polos distintos se atren y polos iguales se repelen; por tanto, es necesario que los polos tengan nombres diferentes. Llamamos norte a un polo porque es el polo atraído por el polo norte magnético de la Tierra (en realidad, el sur). Llamamos al otro polo sur, porque es atraído por el polo sur magnético de la Tierra (en realidad, el norte). Éstos no son más que nombres introducidos por conveniencia. El campo magnético de una barra imantada es completamente simétrico respecto a un plano que corte el eje polar por la mitad. Si súbitamente el polo norte de todo campo magnético en el Universo se convirtiera en el polo sur, y todo polo sur en polo norte, no se produciría ningún cambio detectable por experimento. Sería tan sin sentido decir que se había producido tal cambio, como decir que el Cosmos se había invertido cabeza abajo. (Esto es lo que los físicos habrían dicho antes de 1957. En 1957 ocurrió algo que cambió radicalmente las cosas, pero no queremos anticipar nuestra historia.)

La situación, sin embargo, continúa embrollada. Después de todo, una aguja imantada se comporta de forma completamente asimétrica si se la coloca encima o debajo de una corriente. Es verdad que no podemos examinar al microscopio los extremos de una aguja imantada y encontrar algo que nos diga cuál es cada polo. Sin embargo, es evidente que un polo es el norte y el otro el sur. ¿Hay *alguna* diferencia clara entre los polos que no sea que los polos distintos se atraen y los polos iguales se repelen? Si pintamos de rojo el polo norte de una aguja imantada, siempre será el extremo rojo el que señala a la izquierda cuando lo colocamos sobre una corriente que se aleja de nosotros. ¿Cómo se puede explicar esta aparente asimetría –la "sorpresa de Mach"– y seguir sosteniendo que los campos electromagnéticos son fundamentalmente simétricos?

No se encontró una respuesta satisfactoria hasta el siglo XX, cuando los físicos descubrieron que las propiedades de un imán son sencillamente consecuencia de los movimientos de rotación de las partículas cargadas en el interior del imán. Para aclararlo tenemos primero que echar una rápida ojeada a la estructura de los átomos. Examinaremos el *modelo catónico de Bohr,* un modelo fundado en la obra teórica de Niels Bohr, el gran físico danés muerto en 1962. Un modelo que ahora sabemos es una tosca aproximación. Se trata, como lo presentó George Gamow, con su habitual capacidad metafórica, del átomo despojado de su carne, para no dejar más que su esqueleto. Los detalles completos únicamente pueden ser descritos con precisión mediante la complicada matemática de la moderna teoría de los cuantos. Sin embargo, el modelo de Bohr todavía es enormemente útil para dar una idea tosca, simbólica, de lo que se conoce sobre la estructura del átomo; no hay razón para que nos avergoncemos de usarlo.

En el modelo atómico de Bohr el núcleo tiene en torno a sí uno o más electrones que circulan a su alrededor en órbitas, dispuestas de forma concéntrica. Cada electrón transporta una sola carga (un cuanto) de electricidad negativa. Normalmente el átomo no lleva carga, porque el número de electrones se equilibra con el número de protones que hay en el núcleo. Cada protón transporta una unidad de carga positiva. Además, en el núcleo puede haber uno o más neutrones (partículas sin carga).

La figura 49 es una descripción del más sencillo de todos los átomos, el átomo de hidrógeno. El núcleo consiste en un protón cargado positivamente. A su alrededor circula un electrón con carga negativa. Si el núcleo tiene, además del protón, un solo neutrón, entonces es uno de los *isótopos* del hidrógeno (figura 50). (Un isótopo es una forma variante de un elemento, que resulta cuando en el núcleo varía el número de neutrones.) Este isótopo se llama deuterio, porque tiene dos partículas en su núcleo. El neutrón añadido lo hace más pesado, y por ello se le suele llamar hidrógeno pesado.

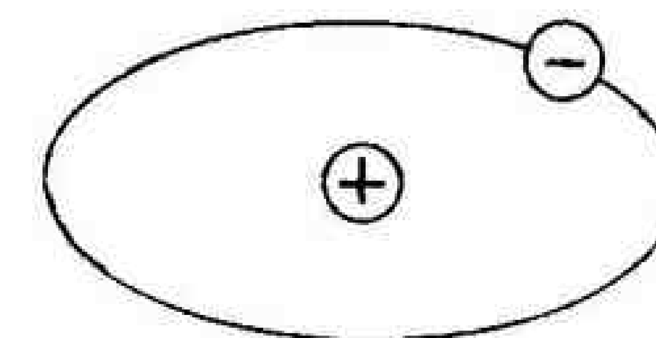


Fig. 49. Hidrógeno.

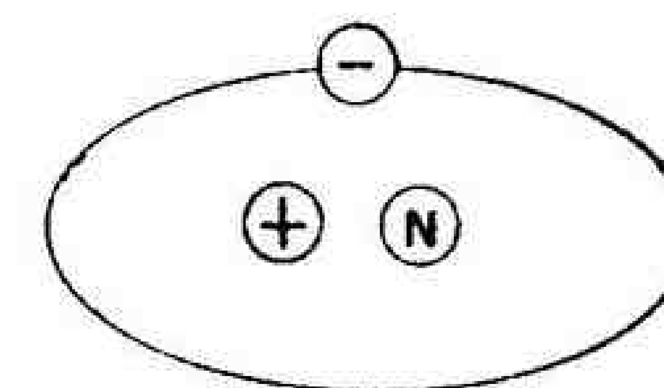


Fig. 50. Deuterio, o hidrógeno pesado.

La figura 51 representa el átomo que le sigue en sencillez: el de helio. En su forma más común tiene un núcleo que contiene dos protones y dos neutrones. Moviéndose en torno al núcleo hay dos electrones.

Dado que la estructura del átomo es aproximadamente esférica, podemos representarlo como una pequeña pelota. "Para muchos

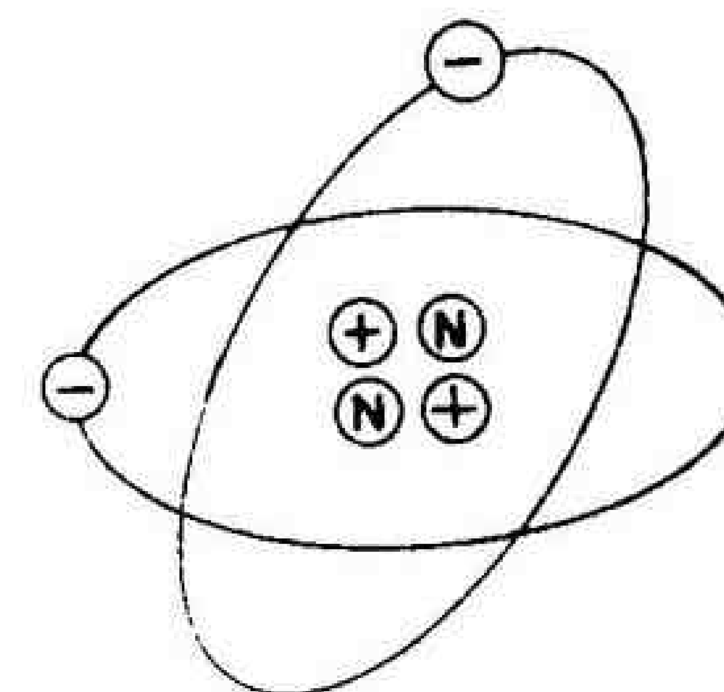


Fig. 51. Helio.

maestros un átomo es siempre una pelota", según el físico nuclear Samuel Goudsmit (citado en el libro *The Man in the Thick Lead Suit*, 1954, de Daniel Lang). "En invierno es una pelota de baloncesto, en primavera una pelota de béisbol y el resto del tiempo una pelota de ping-pong. El átomo no se explica mejor por tales imágenes que la idea de Dios por la figura de un anciano de larga barba sentado sobre una nube."

Es conveniente recordar la tosquedad de los modelos. Por otra parte, sería difícil prescindir de ellos. Los químicos todavía dibujan diagramas de moléculas empleando guiones para simbolizar las valencias que enlazan los átomos y los mantienen juntos, y por razones semejantes los físicos continúan hablando en términos del modelo atómico de Bohr. Es una taquigrafía simbólica manejable. En definitiva, ¿qué es una pelota? En el lenguaje corriente es cualquier objeto de forma aproximadamente esférica. Un término bastante amplio para incluir un balón de fútbol, una palomita de maíz y un pañuelo arrugado formando como una pelota, es sin duda lo bastante amplio para incluir la estructura vagamente parecida a una pelota de un átomo aunque su "nube" de electrones únicamente puede ser descrita mediante complicadas funciones de probabilidad.

El electrón que circula en torno al núcleo de un átomo es una carga de electricidad negativa en movimiento. Su movimiento crea un campo magnético con un eje que pasa por el centro del átomo, perpendicular al plano de la órbita del electrón. Este campo se llama *momento magnético orbital* del electrón. Además de su movimiento orbital, el electrón tiene también lo que se llama *spin*, giro sobre sí mismo. (El doctor Goudsmit, citado antes, fue uno de los codescubridores del spin.) En el modelo de Bohr, el spin puede ser representado como la rotación del electrón sobre un eje a través de su centro, lo mismo que la Tierra gira sobre sí misma mientras se mueve alrededor del Sol. De este modo crea un pequeño campo magnético, con un eje que coincide con el eje de rotación. Es lo que se llama *momento magnético de spin* del electrón. La existencia de tal campo induce a pensar que un electrón ha de tener una estructura que lo haga moverse realmente a través del espacio; pero si esto es así, sigue siendo un profundo misterio cómo pueda ser tal estructura.

La figura 52 muestra el eje magnético de un campo magnético orbital de un electrón. El extremo marcado como norte es el extremo desde el cual, si usted mira hacia abajo al electrón, ve su trayectoria, en el sentido de las agujas del reloj, alrededor del núcleo.

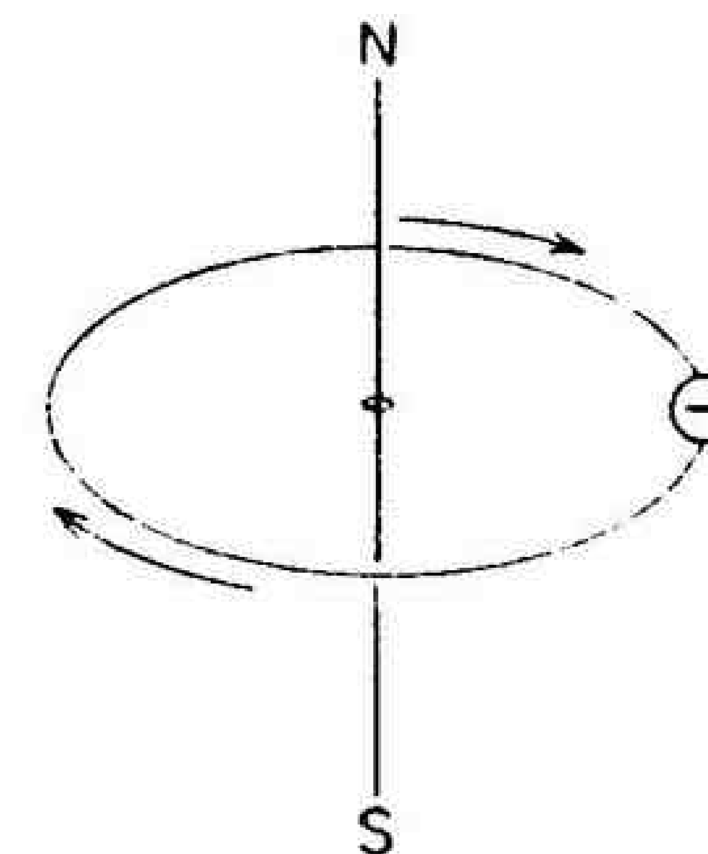


Fig. 52. Momento magnético orbital de un electrón.

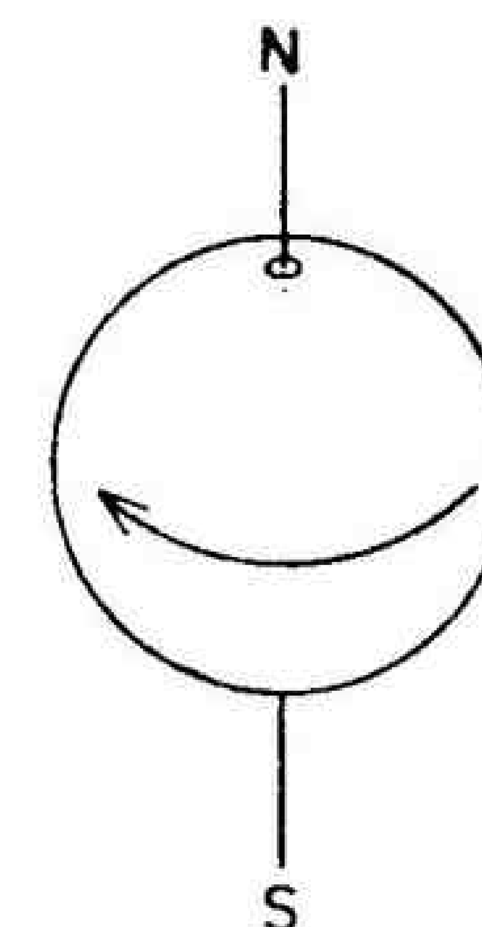


Fig. 53. Momento magnético de spin de un electrón.

La figura 53 muestra el eje magnético del campo magnético de spin de un electrón. También el extremo norte es el extremo desde el cual, si se mira hacia abajo, se ve al electrón girando sobre sí mismo en el sentido de las agujas del reloj. En ambos casos la denominación se ajusta al uso convencional de la regla de la mano izquierda. Los físicos prefieren emplear el signo "más" para el norte y el signo "menos" para el sur, pero como éste no es un libro técnico nos atendremos a los términos más corrientes.

Además de los campos magnéticos originados por los movimientos de spin y los movimientos orbitales, hay campos parecidos engendrados por los movimientos del spin de protones, neutrones e incluso por el spin del núcleo del átomo como conjunto. (Por qué el

spin de los neutrones, que no tienen carga eléctrica, crea un campo magnético, es todavía un misterio. Lo examinaremos otra vez más adelante.) Que el término *spin* es apropiado se demuestra por el hecho de que las partículas con spin se comportan como pequeños giroscopios; resisten los movimientos de desviación. En 1963 muchos laboratorios trabajaban en el desarrollo de giroscopios nucleares para guiar las naves espaciales; estos fantásticos giroscopios no tienen partes móviles que se desgasten, y no sufren derivas a consecuencia de la fricción. Están basados en las propiedades giroscópicas de las partículas nucleares con spin.

Cuando dos momentos magnéticos en el interior de un átomo tienen paralelos o casi paralelos sus ejes, con sus extremos norte apuntando en la misma dirección, los campos se combinan para producir un campo más potente. Si los ejes son antiparalelos (apuntando en direcciones opuestas), los campos se neutralizan entre sí para producir un campo más débil, o ningún campo. Por ejemplo, los dos electrones del átomo de helio giran en la misma órbita, pero en direcciones opuestas; por tanto, sus momentos magnéticos orbitales se anulan. Lo mismo ocurre con los momentos magnéticos del spin. Uno gira en el sentido de las agujas del reloj, el otro al contrario. Se dice entonces que el átomo está *equilibrado en spin.* Esta mutua anulación de los campos magnéticos orbital y de spin produce un átomo de helio que es magnéticamente neutro. No tiene momento magnético *resultante.* Lo mismo vale para todos los demás gases raros (neón, argón, criptón, xenón, radón), gases que tienen sus envolturas exteriores ocupadas con todo su contingente de electrones. Otros átomos, a causa de la falta de equilibrio entre sus momentos magnéticos internos, tienen un campo magnético resultante de conjunto. (En lenguaje más técnico, el campo resultante es la suma vectorial de todos sus momentos magnéticos internos.) De un átomo de esta clase puede decirse, en términos simbólicos, que posee un spin global, que da un campo magnético resultante con polos norte y sur. En suma, se comporta como un pequeño imán esférico.

Entre los átomos de todos los elementos, el átomo del hierro (a causa del gran desequilibrio de los spins de los electrones) tiene el campo magnético resultante más potente. Se puede pensar que en una barra de hierro cada átomo es un pequeño imán esférico, con polos norte y sur. Todo átomo está firmemente encerrado en su posición en la retícula cúbica del cristal del hierro, pero libre para girar de modo que su eje magnético pueda apuntar en diferentes direc-

ciones. Imantar una barra de hierro no es más que hacer que sus átomos giren hasta que tantos como sea posible se alineen con los ejes magnéticos paralelos. A causa de que los momentos magnéticos se refuerzan unos a otros, la barra adquiere un potente campo resultante.

Hay, desde luego, un límite en la potencia del campo. Los átomos de una barra de hierro no imantada son como una muchedumbre de personas atestadas en una habitación que miran en diferentes direcciones. La habitación queda "imantada" por un orador magnético que consigue que el mayor número posible de personas mire hacia él. Cuantos más giren para mirarle, tanto más fuerte será el campo magnético resultante. El campo llega a su *punto de saturación* cuando todo el mundo en la habitación mira en la misma dirección. Es evidente que no hay modo de hacer más potente el campo.

Por complicadas razones que no pueden explicarse aquí, en una barra de hierro sin imantar los átomos no están orientados en cualquier dirección al azar, sino que tienden a formar pequeños grupos o apiñamientos llamados *dominios,* en los cuales los ejes magnéticos de los átomos son paralelos. Son estos dominios, no los átomos individuales, los que tienen sus ejes en diferentes direcciones. Cuando la barra es imantada sometiéndola a un potente campo exterior, las paredes de estos dominios se mueven a medida que sus átomos giran para alinear sus ejes con el eje del campo exterior.

Muchos libros de texto de física, especialmente los publicados antes de 1950, dan una falsa impresión de lo que ocurre al imantar una barra de hierro. Una figura mostraría los dominios dentro de una barra sin imantar como pequeñas barras imantadas que apuntan en diversas direcciones al azar. En la figura 54 se representa una barra imantada con estos pequeños imanes alineados, apuntando todos en la misma dirección. Se tiene la impresión de que los dominios son pequeñas partes rígidas dentro de la barra que giran sobre sí mismas cuando ésta es imantada. Esto no puede ser, a causa de que cada átomo de hierro está fijado permanentemente en su posición en la retícula del hierro.

Imaginemos una numerosa compañía de soldados que están en una formación de retícula cuadrada en un ancho campo. Cada soldado está firmemente arraigado en un lugar del suelo, pero libre para girar en diferentes direcciones. Una formación de dieciocho soldados, de tres en fondo, están mirando al norte. Tras ellos un grupo de dieciocho soldados, también de tres en fondo, están miran-

do al sur. Cada grupo representa un dominio de átomos del hierro. Imaginemos ahora que el dominio de los soldados mirando al sur son persuadidos para que miren al norte. Sin embargo, en vez de volverse todos a la vez, primero se vuelve la fila más al norte de los soldados, después la siguiente y así sucesivamente hasta que, por fin, todos los soldados del dominio están mirando al norte. Cuando las filas giran, la pared del dominio –la línea divisoria entre los dos grupos de soldados– se mueve gradualmente hacia el sur hasta que los dos dominios se unen en un gran dominio mirando al norte. Esto nos ofrece una tosca visión de lo que pasa a los átomos de una barra de hierro cuando se la imanta.

Los dominios que hay en la barra no se alinean todos simultáneamente. En consecuencia, el campo magnético de la barra se va haciendo más potente, en una serie de pequeños saltos súbitos. Si se enrolla un alambre alrededor de la barra que está siendo imantada, cada salto induce un pequeño voltaje en el alambre. Estos impulsos eléctricos pueden ser amplificados y oídos realmente como una serie de chasquidos: una especie de crujido, como el de un papel cuando se le arruga. Es lo que se llama efecto Barkhausen, porque fue el ingeniero alemán Heinrich Barkhausen quien lo descubrió en 1919. Si se visita el Museo de Ciencia e Industria de Chicago se puede pulsar un botón y oír efectivamente el efecto Barkhausen. Cuando se observa una pequeña barra de hierro moverse lentamente en un campo magnético, se oirá el ruido, amplificado, de los crujidos producidos por el movimiento discontinuo de las paredes de los dominios, conforme los átomos de la barra se van alineando.

Durante siglos, los físicos se sintieron desconcertados ante la imposibilidad de crear un imán monopolo; es decir, un imán con un solo polo. También por el hecho de que siempre que la barra imantada se corta por la mitad, resultan dos imanes más pequeños. Si las dos mitades son cortadas a su vez por la mitad, hay cuatro imanes pequeños, todos ellos completos, con un polo norte en un extremo y un polo sur en el otro.

La moderna teoría del magnetismo esclarece por completo los dos misterios. Imaginemos simbólicamente una barra imantada como un cilindro con pequeñas flechas pintadas en él, como se ve en la figura 54. Las flechas indican la dirección en que la mayoría de los electrones de la barra están girando sobre sí mismos. Es el spin conjunto del cilindro el que lo hace imán. Si se mira a un extremo del cilindro, se verá el spin en el sentido de las agujas del reloj. Por convención se llama a este extremo polo norte magnético del

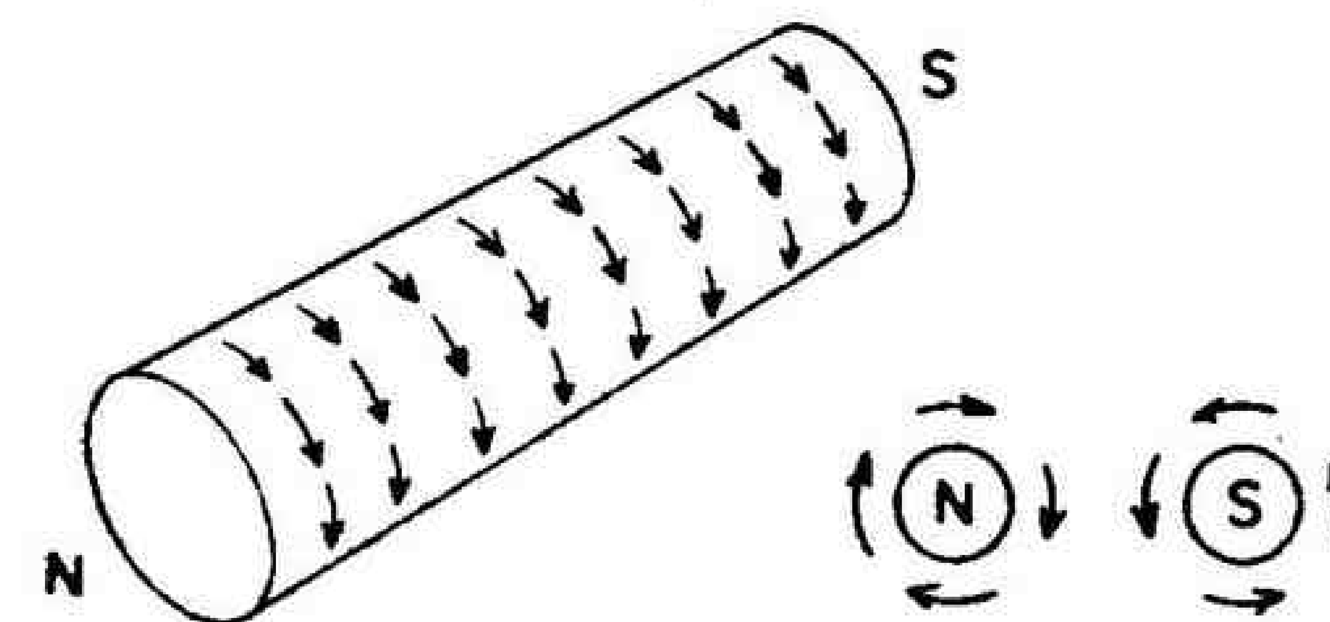


Fig. 54. Figura simbólica de una barra imantada.

cilindro. Si se mira al otro extremo, se verá el spin en sentido contrario al de las agujas de un reloj. Este extremo es el polo sur magnético. Los polos no son más que rótulos para los extremos opuestos enantiomorfos de un cilindro rotatorio simbólico. No son ciertamente "cosas" en el mismo sentido que lo son las cargas positivas y negativas. (Acaso deberíamos decir que no son entidades en el mismo sentido que las cargas positivas y negativas *parecen* ser entidades a la luz de nuestra actual ignorancia de qué son en realidad.)

Es fácil ver por qué no hay monopolos[3], y por qué todo segmento cortado de una barra imantada no puede dejar de tener un polo norte y un polo sur. Sería tan difícil tener un imán monopolo como girar un cilindro que sólo tuviera un extremo. Incluso un imán en forma de disco, como el representado en la figura 55, con eje magnético perpendicular a la superficie, tiene que ser norte en un lado y sur en el otro. Sería tan difícil hacer un imán en forma de disco con el norte en ambos lados como hacer girar una rueda de

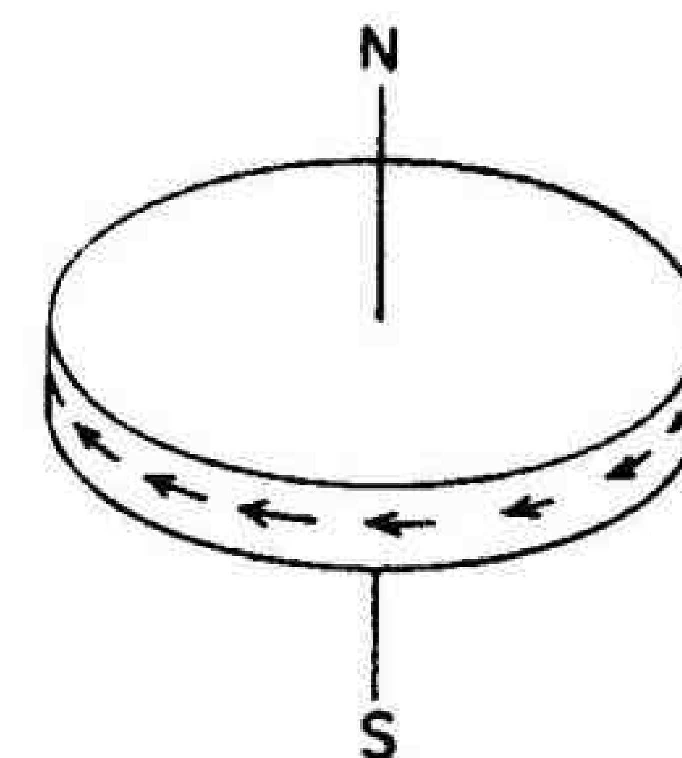


Fig. 55. Figura simbólica de un disco imantado.

tal manera que se la pudiera ver girando en el sentido de las agujas de un reloj desde ambos lados. Sería tan imposible cortar una barra imantada por la mitad y no producir dos réplicas más pequeñas, como cortar un cilindro rotatorio por la mitad y no producir dos cilindros rotatorios más pequeños.

Ahora estamos por fin en situación de comprender por qué las relaciones del campo magnético no representan una desviación fundamental de la simetría. Imagínense todos los campos magnéticos del Universo como cilindros de diversos tamaños, desde el tamaño de un electrón al tamaño de una galaxia, cada uno pintado con flechas que indicasen la dirección de spin. Si se coloca un cilindro ante el espejo, se ve en seguida que puede ser superpuesto a su imagen. Todo lo que hay que hacer es dar la vuelta a la imagen especular, y sus flechas coincidirán con las del cilindro real. Si un extremo del cilindro difiere en algún modo esencial del otro –si, por ejemplo, los cilindros fueran conos–, entonces serían asimétricos y no superponibles sobre sus imágenes. Pero los extremos no difieren.

El hecho de que cilindros rotatorios sean simétricos no impide, naturalmente, que sus extremos se junten de dos maneras esencialmente distintas. Si se juntan de modo que sus spins (las direcciones de las flechas) vayan en la misma dirección, hay una unión de polos *opuestos*. Los spins se refuerzan unos a otros y se produce una fuerte atracción entre ellos. Si se reúnen con sus spins (direcciones de las flechas), oponiéndose unos a otros, hay una unión de polos *iguales*. Los spins se opondrían entre sí, y se produciría una fuerte repulsión. Por conveniencia, es necesario dar diferentes nombres a los dos extremos. Una vez que hayamos decidido el rótulo de uno de los extremos, automáticamente determinamos el nombre de cada extremo para todos los cilindros (campos magnéticos) del Universo. Como hemos visto, los científicos resolvieron llamar norte al extremo de una barra imantada que es atraído por lo que llamamos polo norte magnético de la Tierra. Una vez tomada esta decisión, todo campo magnético en el Cosmos adquiere una denominación de los extremos conforme a la opción inicial.

¿Se ve ahora por qué no podemos utilizar el experimento de la brújula y el alambre (o cualquier ejemplo semejante de asimetría magnética) para comunicar al planeta X lo que significan derecha e izquierda? Podemos decirles que suspendan una barra imantada sobre una corriente. Podemos explicarles que la barra se comporta como un cilindro con flechas pintadas, haciéndolo girar hasta que las flechas más cercanas al alambre señalen en la misma dirección

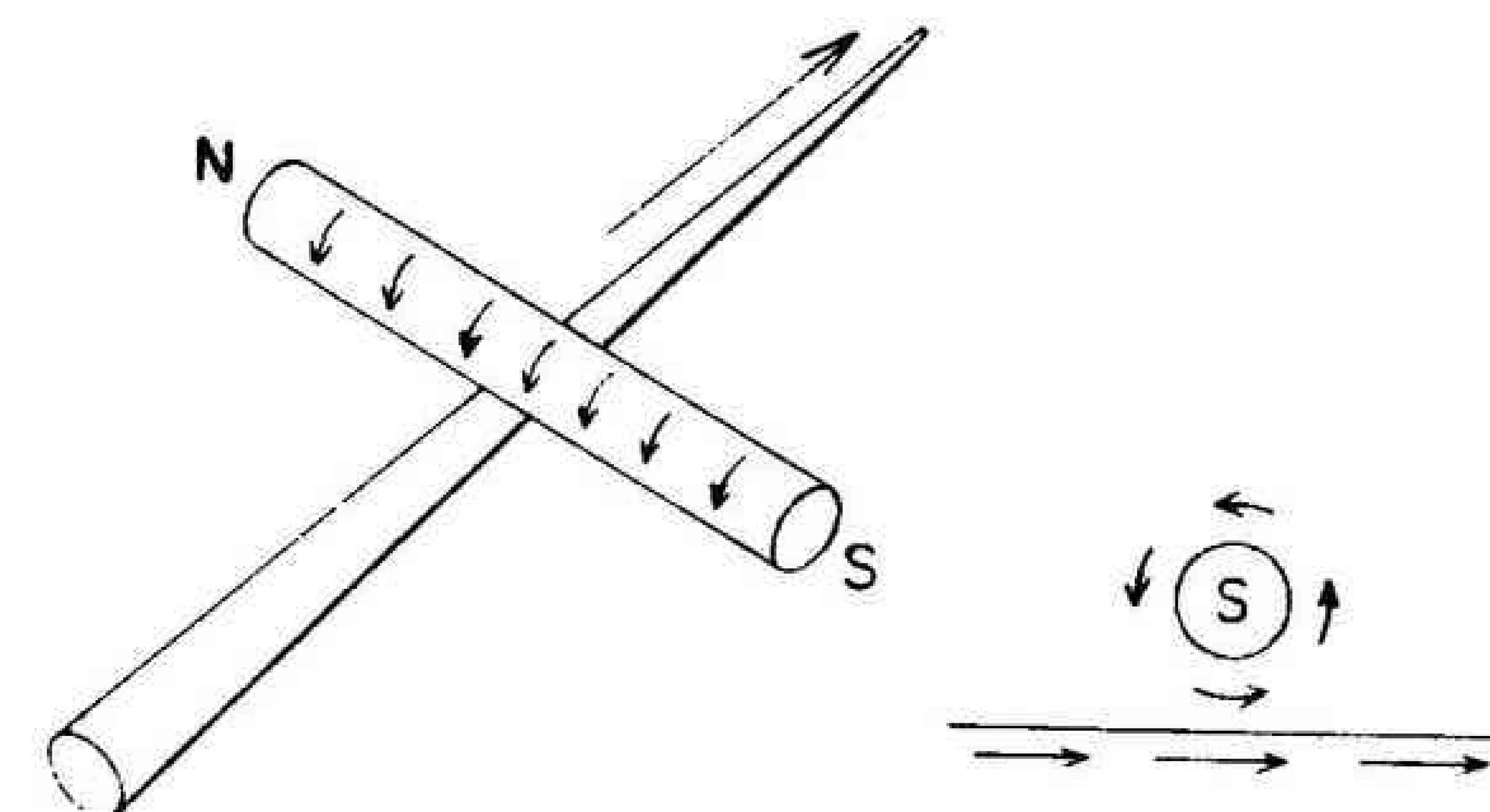


Fig. 56. Simetría en el experimento del alambre y la brújula.

en que fluye la corriente (figura 56). Ahora nos atascamos sin remedio. Como los cilindros son iguales en todos los aspectos, excepto en que uno es la imagen especular del otro, no tenemos manera de comunicar al planeta X qué extremo hemos decidido llamar norte. Podemos decir: «Norte es el extremo del cilindro en que las flechas se mueven como las agujas de un reloj, pero no tenemos medio de explicar qué entendemos por 'sentido de la agujas de un reloj'.» El magnetismo no sirve de mayor ayuda para resolver el problema de Ozma que la existencia de ruedas y cilindros rotatorios en el mundo. Lo que a Mach, Pasteur y otros científicos de su tiempo les parecía un caso claro de asimetría en las leyes naturales, demuestra ser pseudo-asimetría una vez que se ha comprendido la teoría moderna del magnetismo.

El experimento que sorprendió a Mach puede compararse a una fila de hámsters muy juntos, corriendo sobre una ancha cinta sinfín (véase figura 57). Activada por un motor, esta especie de noria se mueve en la dirección indicada. Su movimiento corresponde al movimiento de la corriente por el cable que se aprecia en la figura 47. La fila de hámsters son los átomos que hay en una barra de hierro imantada. Ya que los animalitos no pueden trotar hacia atrás ni hacia los lados, cualquiera que sea la forma de colocar la fila, siempre se desplazarán para colocarse en una fila perpendicular al movimiento de la superficie que hay debajo de sus patas. El extremo de la fila a su derecha corresponde al polo norte de un imán de barra. Apuntará siempre en el mismo sentido, porque si apuntara en el sentido opuesto los hámsters tendrían que trotar hacia atrás.

Esta aparente asimetría, la asimetría que dejó perplejo a Mach,

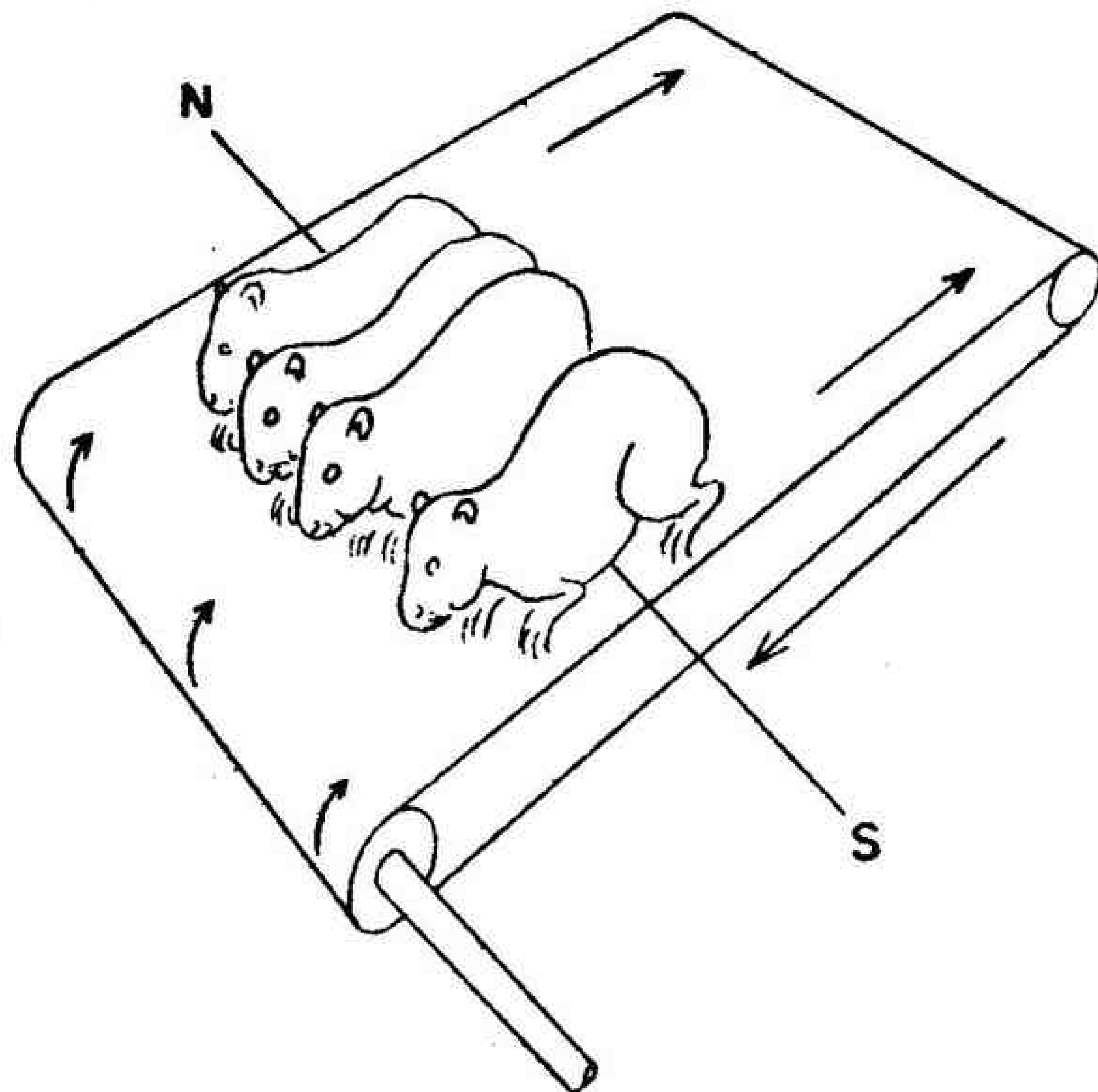


Fig. 57. Representación simbólica del experimento con el cable indicado en la figura 47.

¿podría ser utilizada para comunicar al planeta X una definición operacional de derecha e izquierda? No, porque la fila de hámsters es bilateralmente simétrica. Para explicar al planeta X qué extremo de la fila apunta siempre hacia la izquierda cuando un observador mira en la dirección del movimiento de la cinta sinfín, hay que explicar primero qué entendemos por lado derecho e izquierdo de un hámster. Esto es, desde luego, precisamente lo que no hemos encontrado modo de hacer.

Las intuiciones de Mach eran mejores de lo que él pensaba. El campo magnético resulta ser simétrico después de todo. No fue hasta 1957 que se anunció un experimento mucho más sorprendente, pero tenemos que explicar muchos preliminares antes de poder describir el experimento.

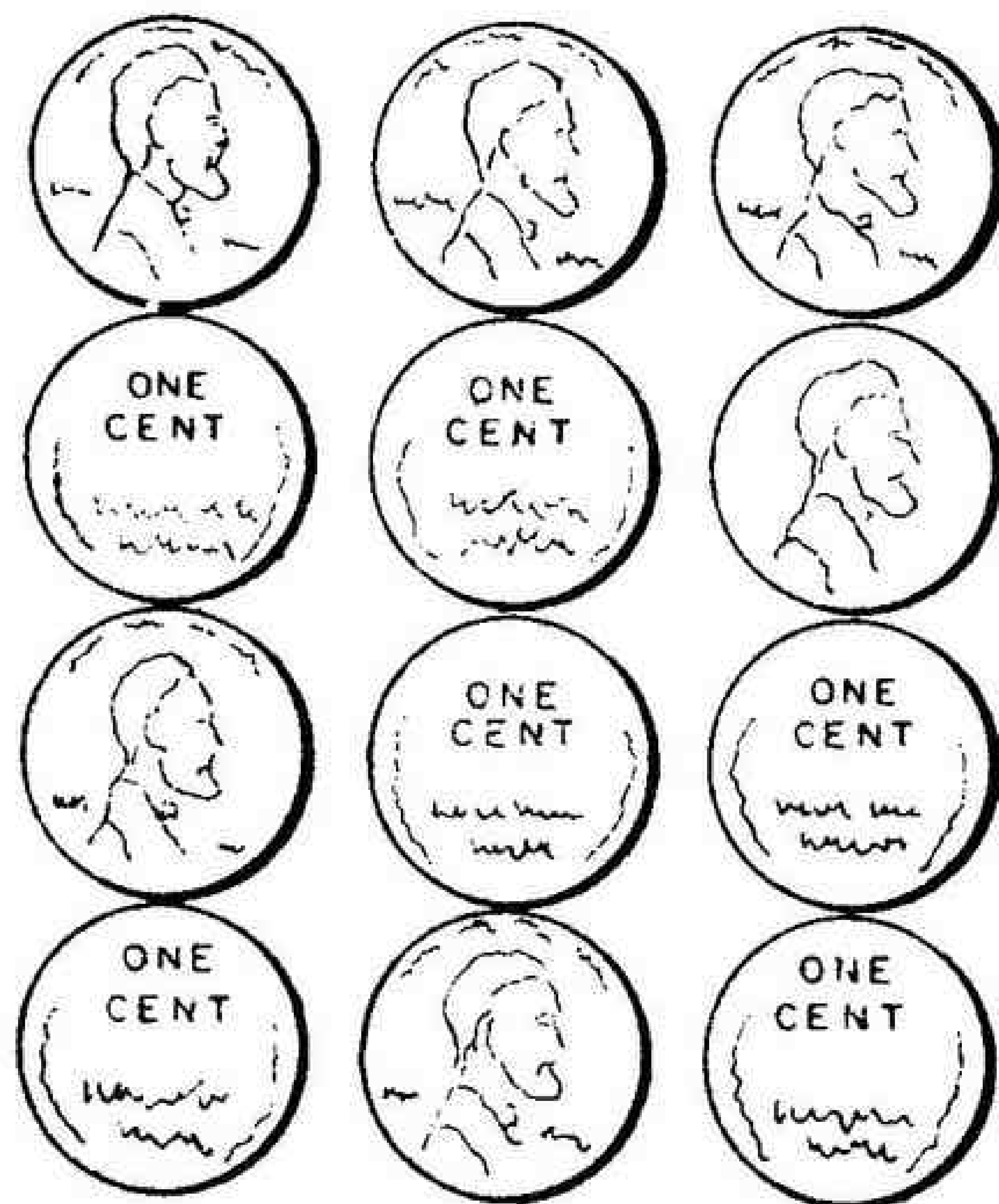
20. Paridad

Hace veinte años, si se hubiera preguntado a un físico por una solución para el problema de Ozma, habría contestado: *No* hay solución. No hay manera, habría dicho, de comunicar la significación de izquierda y derecha a los seres inteligentes del planeta X, sin llamar su atención hacia una estructura particular asimétrica –una configuración de estrellas, un rayo de luz polarizada circularmente, o cosas parecidas que ellos y nosotros pudiéramos observar en común–. No hay experimento que implique alguna de las leyes conocidas de la naturaleza capaz de suministrar una definición operacional de derecha e izquierda.

Cuando algo en la naturaleza permanece siempre igual, los físicos gustan de expresar la permanencia por una ley de conservación. Por ejemplo: la ley de conservación de masa-energía declara que la cantidad total de masa-energía en el Universo nunca cambia. La masa es una forma de energía (con arreglo a la famosa fórmula de Einstein, $E=mc^2$), y nunca hay un aumento o una pérdida de masa-energía. La ley de conservación que implica la simetría especular invariable, fundamental del Universo –su falta de preferencia por la derecha o la izquierda en sus leyes básicas– es la ley de conservación de la paridad.

El término "paridad" fue usado en un principio por los matemáticos para distinguir entre números pares e impares. Si dos números son ambos pares o ambos impares se dice que tienen la misma paridad. Si uno es par y el otro impar se dice que tienen paridad opuesta. El término se aplica de muchas maneras diferentes en cualquier situación en la que las cosas pertenecen a dos clases que se excluyen mutuamente y pueden ser identificadas con los números pares e impares. Como ejemplo simple, coloque usted tres monedas

en fila, una al lado de la otra, cara arriba. Después dé la vuelta a las monedas, una cada vez, tomándolas en el orden que prefiera, pero dándoles un número par de vueltas. Verá que por muchas vueltas que les dé –2, 74, 3.496, cualquier número par–, al final seguro que tendrá uno de los cuatro modelos siguientes:



Coloque las tres monedas, todas con la cara hacia arriba, otra vez en una fila. Esta vez déles un número impar de vueltas tomando las monedas en el orden que le plazca. Esté seguro de que al final tendrá uno de los modelos representados en el dibujo de la página siguiente:

En el primer dibujo podemos decir que las monedas tienen paridad par, y en el segundo paridad impar. Si comenzamos con un modelo par y damos, por ejemplo, diez vueltas, el modelo final con seguridad será par. Si se comienza por un modelo impar y se dan diez vueltas, al final tendremos ciertamente un modelo impar. Por otra parte, todos los modelos cambian de paridad si se da un número impar de vueltas.

Muchos trucos con cartas, monedas y otros objetos sacan partido de estos principios. Por ejemplo, pídale a alguien que coja un puñado de monedas de su bolsillo y las ponga sobre una mesa. Mientras usted está de espaldas, él vuelve al azar las monedas, una por una, diciendo: "Vuelvo", cada vez que vuelve una moneda. Se

detiene cuando le parece, y tapa una moneda con la mano. Usted se vuelve y le dice si la moneda tapada es cara o cruz.

El método es una simple aplicación de lo que los matemáticos llaman *parity check* (que podríamos traducir en español por "comprobación de paridad"). Antes de volverse de espaldas, usted cuenta



el número de caras y recuerda si es un número par o impar. Si el otro da un número par de vueltas, usted sabe que las caras siguen lo mismo. Un número impar de vueltas cambia la paridad; contando las caras, después de que usted se vuelve, sabrá usted si la moneda tapada es cara o cruz. Para variar el truco puede decirle que tape dos monedas y le podré decir si son iguales o no.

EJERCICIO 14: *Coloque seis vasos en fila, los tres primeros con la boca hacia arriba, y los tres siguientes invertidos. Tome un par de vasos, uno en cada mano, y dé la vuelta a los dos a la vez. (Es decir, si un vaso tiene la boca hacia arriba se le vuelve boca abajo y viceversa.) Haga lo mismo con otro par de vasos. Continúe volviendo vasos todo el tiempo que usted quiera. ¿Es posible terminar con los seis vasos boca arriba? ¿Y con todos los vasos boca abajo? ¿Puede usted demostrar sus respuestas matemáticamente?*

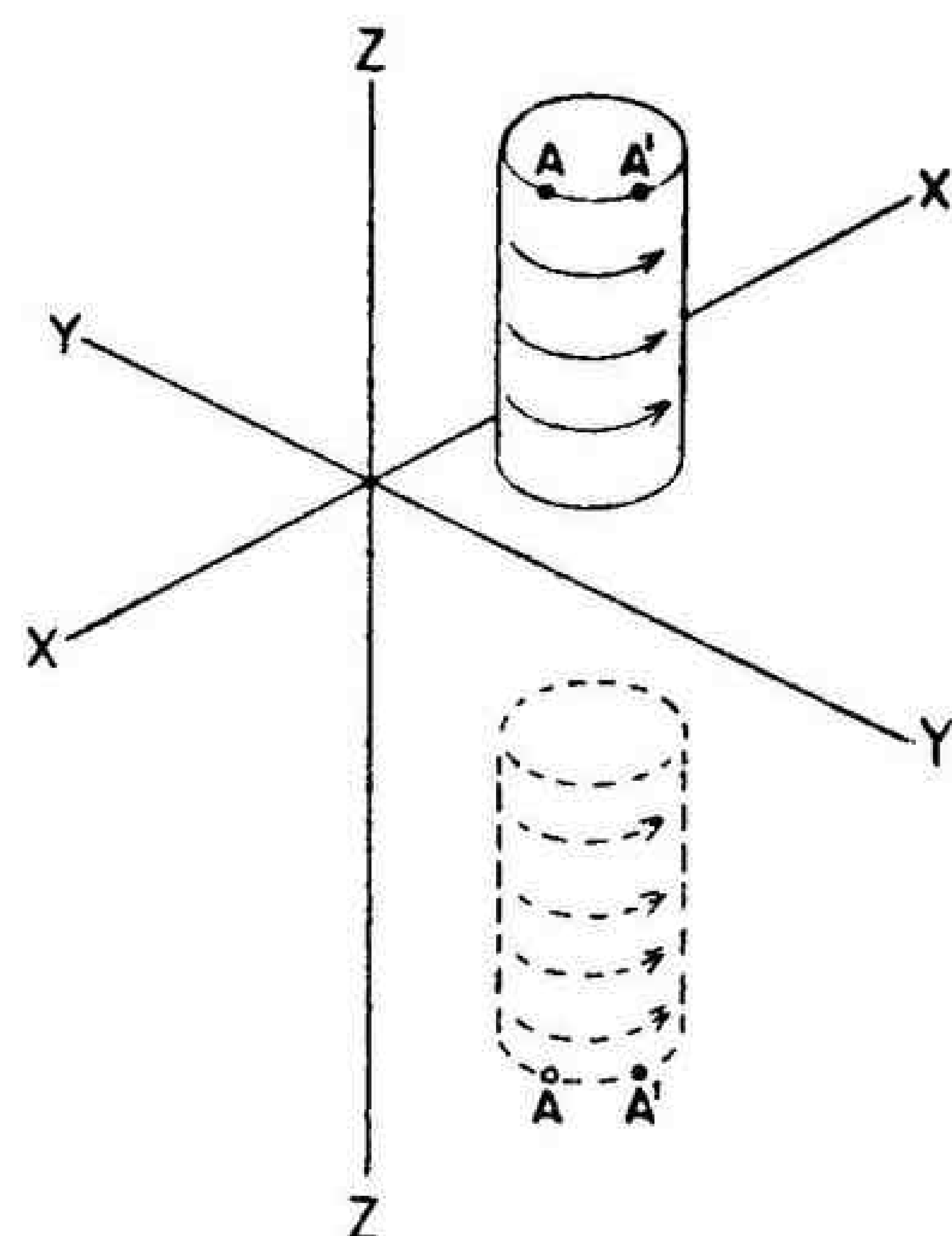


Fig. 58. Un cilindro rotatorio tiene paridad par.

El concepto de paridad se aplica a las figuras rotatorias del espacio de tres dimensiones de la manera siguiente. Considérese el cilindro rotatorio dibujado con líneas llenas en la figura 58. Su estructura puede ser descrita con referencia a un sistema de coordenadas de tres ejes perpendiculares entre sí, tradicionalmente denominados *x*, *y*, *z*. La posición de cualquier punto del cilindro está determinada por un sistema ordenado de tres números. El primer número es la distancia del punto, medida a lo largo del eje *x*, a un plano que pasa a través del centro de coordenadas y perpendicular al eje *x*. El segundo número es la distancia medida de la misma manera a lo largo del eje *y*. El tercer número es la distancia sobre el eje *z*.

El cilindro dibujado con líneas de puntos es la figura que resulta cuando todos los números de coordenada *z*, de las ternas que designan los puntos del cilindro, son cambiados de signo, de más a menos. Obsérvese que cuando el cilindro superior gira en la dirección de las flechas, el punto A en su borde superior se mueve de A a A'. Las posiciones de A y A' en el cilindro de puntos muestran que gira en la misma dirección. Ciertamente, el cilindro ha sido invertido por esta transformación, pero como los extremos del cilindro no se diferencian, el cilindro superior y el inferior (incluyendo sus spins) son

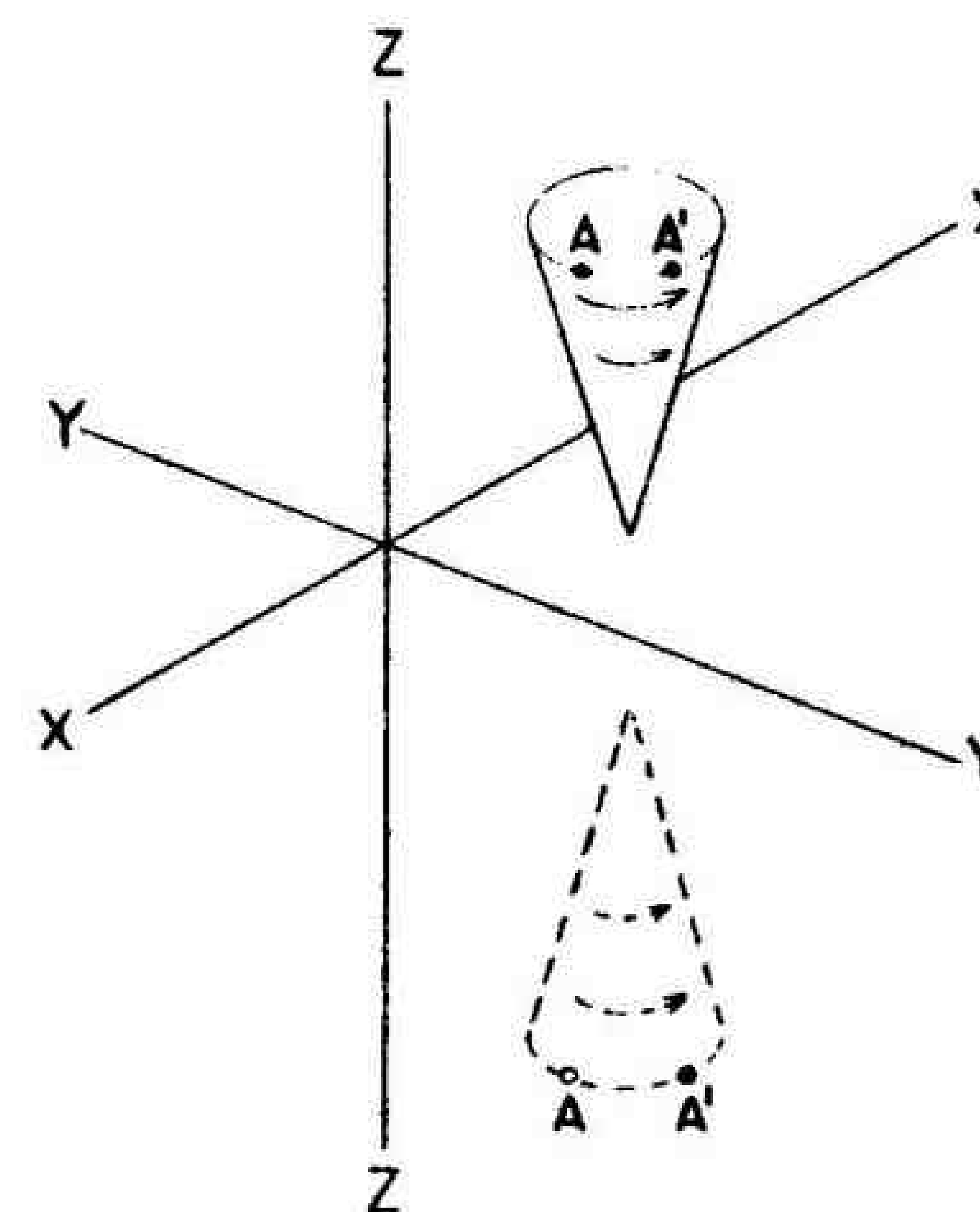


Fig. 59. Un cono rotatorio tiene paridad impar.

superponibles. En suma, todo el sistema queda sin cambios al cambiar de signo todos los números *z*.

Veamos ahora el cono rotatorio dibujado con líneas llenas en la figura 59. Debajo está el cono que resulta cuando los números de la coordenada *z* cambian de más a menos. ¿Son superponibles las dos figuras? No; son imágenes especulares una de otra. Si usted invierte el cono superior de modo que coincida, punto por punto, con el cono inferior, entonces los spins siguen direcciones contrarias. Y si vuelve los conos de manera que sus spins coincidan, los conos señalarán en dirección opuesta. El cono rotatorio es un sistema asimétrico con lateralidad.

No es difícil ver que cualquier sistema simétrico en el espacio tridimensional queda sin alterar por el cambio de signo de una coordenada cualquiera. De tales sistemas se dice que tienen una paridad par. Los sistemas asimétricos quedan transformados en sus imágenes especulares por cambio de signo de una coordenada. De tales sistemas se dice que tienen una paridad impar. Las tres coordenadas, cada una de las cuales puede ser más o menos, se comportan como las tres monedas, cada una de las cuales puede ser cara o cruz. Si el sistema es asimétrico, cualquier número *impar* de cam-

bios de signo tiene el mismo efecto que cambiar un signo: es la imagen especular del sistema. Si se cambian los signos de los tres ejes, el sistema queda reflejado, porque 3 es número impar. Cada cambio individual produce una imagen especular, pero si una imagen especular es reflejada se vuelve al comienzo. Todo número par de cambios de signo deja el sistema inalterado respecto a la derecha y la izquierda. (Ésta es la razón de que los dos espejos descritos en el capítulo 3 den imágenes sin invertir, porque invierten *dos* ejes del sistema de coordenadas.) Todo número impar de cambios de signo lo convierte en su imagen especular. Naturalmente si el sistema es simétrico (tiene paridad par), entonces cualquier número de cambios de signo, sea par o impar, deja el sistema inalterado.

Los físicos encontraron útil, en los años veinte, aplicar estos conceptos matemáticos a las funciones "de onda" que describen las partículas elementales. Cada función contiene números x, y, z, de coordenadas espaciales. Si un cambio en el signo de un número de las coordenadas (o de los tres) deja inalterada la función, se dice que la función tiene paridad par. Esto se indica asignando a la función un número cuántico de "+1". Una función que cambia de signo cuando cambia uno de los números de las coordenadas (o los tres), se dice que tiene paridad impar; ello se indica por un número cuántico de "–1".

Consideraciones teóricas (tales como la simetría bilateral del propio espacio), así como los experimentos con partículas atómicas y subatómicas, indican que en cualquier sistema aislado siempre se conserva la paridad. Supongamos, por ejemplo, que una partícula con paridad par (+1) se divide en dos partículas. Las dos partículas pueden tener ambas paridad par o ambas paridad impar. En los dos casos la suma de la paridad es par, a causa de que un número par más un número par es par y un número impar más un número impar es par. Para decir lo mismo de modo diferente, el *producto* de dos números de igual paridad es +1 (+1 multiplicado por +1 es +1 y –1 multiplicado por –1 es también +1). El estado final del sistema tiene una paridad total de +1. La paridad se conserva. Si una partícula par se divide en dos partículas, una par y la otra impar, la paridad total del estado final sería impar. (Un número par más un número impar es un número impar o sea +1 multiplicado por –1 es –1.) La paridad no se conservaría.

Es importante darse cuenta de que no estamos tratando ya con sencillas figuras geométricas en el espacio tridimensional, sino con fórmulas complejas y abstractas de la mecánica cuántica. Es imposible entrar en más detalles técnicos sobre la significación exacta de la conservación de la paridad en la teoría de los cuantos o sobre las múltiples maneras en que ha resultado ser una noción útil. Afortunadamente, es fácil comprender las consecuencias del concepto. En 1927, un físico húngaro, Eugene P. Wigner, ahora en la Universidad de Princeton, pudo demostrar que la conservación de la paridad descansa por completo en el hecho de que todas las fuerzas implicadas en las interacciones entre partículas no tienen ninguna preferencia por la derecha o la izquierda[1]. En otras palabras, toda violación de la paridad equivaldría a una violación de la simetría especular en las leyes básicas que describen la estructura y la interacción de las partículas. Los físicos saben desde hace mucho tiempo que la simetría especular prevalece en el macrocosmos de planetas rotatorios y bolas de billar que se entrechocan. La conservación de la paridad indica que esta simetría especular se extiende a los niveles atómicos y subatómicos. La naturaleza, al parecer, es completamente ambidextra.

Esto no significa que la asimetría no pueda aparecer en el Universo en toda clase de formas. Significa únicamente que cualquier cosa que la naturaleza hace a izquierdas, puede hacerla igual de fácil y eficientemente a derechas. Por ejemplo, nuestro Sol se mueve a través de la galaxia en tal dirección que el movimiento de la Tierra respecto a la galaxia es una trayectoria helicoidal. Éste es un claro ejemplo de asimetría astronómica. Pero esta asimetría es simplemente un accidente en la evolución de la galaxia. Otros planetas que circulen en torno a otros soles, sin duda trazan trayectorias helicoidales de la mano contraria. Nuestros cuerpos tienen el corazón a la izquierda. Pero ello tampoco implica una asimetría fundamental en la ley natural. La localización del corazón humano es un accidente en la evolución de la vida de nuestro planeta. En teoría podría construirse una persona con el corazón a la derecha; de hecho, como sabemos, tales personas existen realmente. Aquí tenemos un ejemplo de una estructura asimétrica que existe en las dos formas, derecha e izquierda, aunque una de las formas es sumamente rara. La ley de conservación de la paridad no dice que las imágenes especulares de las estructuras asimétricas o de sistemas en movimiento tengan que existir en cantidades iguales. Simplemente afirma que en las leyes naturales no hay nada que prohíba la posible existencia de ambos tipos de lateralidad.

Los físicos explican algunas veces la simetría especular del Universo como sigue. Imagínese una película sobre cualquier proceso

natural. La película es reflejada especularmente y proyectada en una pantalla, de modo que vemos una película trastocada de lo que sucede realmente. ¿Es posible examinar esta película reflejada y decir si ha sido trastocada? No, decían los físicos en los años cuarenta, no es posible. Desde luego, reconoceríamos inmediatamente que ha sido invertida si viéramos en ella alguna estructura asimétrica creada por el hombre, como letras o números impresos, la esfera de un reloj, etc. Pero lo único que nos importa aquí son los procesos fundamentales de la naturaleza incontaminados por la asimetría artificial que introducen los seres vivos. Acaso estamos observando gotas de aceite que caen en el agua o una reacción química. No hay modo, decían los físicos de entonces, de que podamos decir si tal película ha sido vuelta del revés.

Si tenemos una película que muestra el crecimiento de cristales de la mano izquierda de un compuesto de la mano izquierda, es cierto que la inversión de la película mostraría que se están formando cristales de la mano derecha. Pero, a menos que tuviéramos información previa, no podríamos saber que no estábamos observando una película no reflejada del desarrollo de cristales de la mano derecha de un compuesto de la mano derecha. Supongamos que pintamos de rojo el polo norte de una aguja imantada y después tomamos una película en color del experimento brújula-alambre que sorprendió a Mach. La película invertida, ciertamente, mostraría el extremo rojo señalando en dirección errónea. Pero si viéramos esa película sin saber previamente cómo fue hecha, podríamos suponer que alguien ha pintado de rojo el extremo *sur* de la aguja, y todo iría bien. Si los imanes no tienen sus polos rotulados con las letras *N* y *S*, o diferenciados de algún otro modo, una película reflejada de un experimento en que aparecen los polos no proporciona ninguna clave que permita estar seguro de que la película ha sido trastocada.

Todo esto, desde luego, no es sino otra manera de plantear el problema de Ozma. Si pudiera realizarse un experimento que infringiera la ley de paridad y mostrase una preferencia básica de la naturaleza por la derecha o por la izquierda, tendríamos inmediatamente una solución para el problema de Ozma. Simplemente, explicaríamos a los científicos del planeta X cómo hacer el experimento. Gracias a su sesgo asimétrico, nosotros y ellos llegaríamos fácilmente a una comprensión común de derecha e izquierda.

Una vez escribí un brevísimo cuento de ciencia-ficción, titulado *¿Derecha o Izquierda?* (publicado en *Esquire*, febrero 1951), en el

que la ley de la paridad era novelada como sigue: la Tierra se ha visto sorprendida por un ataque solapado de los miembros del Sistema Planetario Zeta-59. Ha sido destruida una fábrica en Alaska, que manufactura unos pequeños aparatos helicoidales que se llaman "helixons", esenciales para el sistema de defensa de la Tierra. Ello provoca una fatal escasez. La fuente más cercana de una nueva provisión es un planeta a medio camino a través de la galaxia –un planeta que fue colonizado hace siglos por los hombres terrestres–. Un grupo de astronautas es enviado con la misión de traer de este planeta una nueva provisión de "helixons". En su camino de vuelta, con un cargamento de "helixons", el navío es víctima de un meteoro que lo voltea varias veces por el espacio de cuatro dimensiones antes de dejarlo caer al espacio de tres dimensiones. La nave tiene que aterrizar en un planeta desconocido para hacer reparaciones. El planeta es una parte de una galaxia que no está en los mapas.

Al capitán de la nave se le ocurre repentinamente que si su nave ha hecho un número impar de volatines en el espacio tetradimensional, la nave entera se habrá convertido en su imagen especular. Todos los "helixons" habrán cambiado de "mano" y, por tanto, no servirán de nada. ¿Cómo puede determinar el capitán, antes de completar su viaje de vuelta, si ha ocurrido o no tal cosa? Estudiar las estructuras asimétricas de la nave –por ejemplo, las palabras de las cartas de navegación– no serviría de nada, porque si la nave se había invertido lo mismo habría sucedido con los astronautas. Las letras impresas parecerían normales a causa de que los dos lados de sus cerebros también se habrían trastocado mutuamente.

El planeta no está habitado, pero, por supuesto, sus sustancias y leyes naturales son las mismas que en la Tierra. La nave espacial tiene un laboratorio bien dotado. ¿Podrá realizarse algún experimento que indique que la nave se ha invertido? El capitán se da cuenta de que no hay tal experimento. Las leyes de la naturaleza tienen simetría especular. La paridad se conserva. Aun en el caso de que se encontrase en el planeta vida carbonosa, de cualquier forma –organismos que contuvieran aminoácidos asimétricos–, no serviría de nada. No hay leyes de la naturaleza que impidan que los aminoácidos sean de la mano derecha.

Seis años después de escribir yo este cuento, quedó irremisiblemente anticuado. En 1957 la ley de conservación de la paridad fue violada. En la Universidad de Columbia se había realizado un experimento en el que un sistema nuclear simétrico se convirtió en asi-

métrico. En las leyes que describen la estructura de ciertas partículas elementales se reveló un sesgo fundamental cuando son sometidas a cierto tipo de reacción. Si mi perplejo capitán espacial hubiera tenido el instrumental necesario habría podido realizar el experimento en el planeta a donde había arribado; de él habría podido deducir si su nave había sido invertida. El experimento de Columbia no es reflejable. Una película del experimento, proyectada invertida, es la película de un experimento que no podría ser realizado en ninguna parte de la galaxia. ¡Es un experimento que resuelve el problema de Ozma!

En el capítulo 22 se detallará la historia de este "brillante y asombroso descubrimiento" (como lo calificó J. Robert Oppenheimer), y se señalarán algunas de sus revolucionarias connotaciones. Pero primero debemos echar una mirada a lo que los físicos llaman las *antipartículas,* y a una extraña e hipotética variedad de materia conocida como *antimateria.* Las antipartículas están estrechamente asociadas a la violación de la paridad. Conocer algo sobre ellas permitirá comprender más fácilmente esta cuestión.

21. Antipartículas

La historia de las teorías sobre la materia ha oscilado como un péndulo de la sencillez a la complejidad, de ésta a la sencillez y otra vez a la complejidad. La primera oscilación fue larga y lenta. Los griegos tenían una sencilla teoría según la cual todas las sustancias eran combinaciones de cuatro tipos elementales de materia: tierra, aire, fuego y agua. Hasta dos mil años después los datos de la química no hicieron necesario distinguir unos ochenta elementos diferentes, cada uno compuesto de su propio tipo individual de átomos. Estos átomos fueron entonces las "partículas elementales", hasta principios del presente siglo, cuando el péndulo comenzó a oscilar rápidamente otra vez hacia la sencillez. En los primeros años treinta, las diferencias entre los átomos pudieron explicarse elegantemente suponiendo tan sólo *tres* (una menos de las cuatro de Aristóteles) partículas elementales: protones, neutrones y electrones.

Después el péndulo osciló rápidamente otra vez. Hoy los físicos identifican de treinta a cien partículas elementales distintas; la diferencia de número depende de cuáles son llamadas "elementales" y cuáles son consideradas como estados diferentes de la misma partícula. Tal complejidad nuevamente descubierta fastidió a los físicos tanto como la complejidad de la tabla periódica de los elementos, antes de que supieran "explicar" la tabla mediante el modelo atómico de Bohr y sus posteriores refinamientos. Las nuevas partículas son, según la excelente metáfora de C. P. Snow, "tan grotescas como una colección de sellos". "Tienen –dice J. Robert Oppenheimer– una carencia de sentido".

Nadie sabe cuándo retornará el péndulo hacia la sencillez. No faltan especialistas en física de partículas convencidos de que dentro de pocos años, una nueva y elegante teoría, fundada en unas pocas

hipótesis matemáticas sencillas, logrará explicar por qué las partículas son precisamente lo que son, y no otra cosa. El descubrimiento de la "vía óctuple" *(eightfold way)*, realizado independientemente por Murray Gell-Man y Yuval Ne'eman), una sorprendente regla de clasificación que recibe su nombre de una frase religiosa del budismo, representó un paso gigantesco en esa dirección. La "vía óctuple" es llamada así porque comporta la asignación de ocho números cuánticos a cada partícula, correspondientes a ocho magnitudes que han de conservarse. Seguidamente, los números cuánticos son puestos en relación unos con otros gracias a las simetrías de una sencilla estructura de grupo, que los matemáticos conocen por "grupo de Lie" (en honor de Marius Sophus Lie, un matemático noruego). La regla óctuple, conocida como el grupo SU(3), se vio confirmada al ser descubierta una nueva partícula, bautizada "omega-menos". La regla había previsto de antemano muchas de las peculiares propiedades de la nueva partícula: un ejemplo verdaderamente notable del poder de la teoría de grupos, que Wigner había introducido en la mecánica cuántica, al objeto de predecir las propiedades de nuevas partículas. Siguiendo con la metáfora de Snow, la vía óctuple es una manera de ir pegando sellos, aparentemente al azar, en la hoja de un albúm, buscando que formen un motivo hermoso y simétrico de formas y colores. Las partículas resultan menos "ofensivas" si es posible clasificarlas elegantemente.

Desde el descubrimiento de la vía óctuple, se han producido enormes avances en la clasificación y la explicación de las partículas. Una de las hipótesis iniciales fue denominada de la "oreja de bota", porque en ella se sostenía que no hay partículas fundamentales. Al igual que en el popular chiste en el que un hombre se sostiene en el aire agarrado a las orejetas de sus botas, según esta teoría las partículas constituyen una única familia en la que cada miembro es sostenido por una combinación de los demás. Esta teoría ha sido abandonada ya, en favor de la teoría de los quarks, propuesta por Gell-Mann y George Zweig.

En la teoría de los quarks se afirma que la familia de partículas llamadas hadrones (familia que incluye el protón y el neutrón, pero no el electrón) está formado por combinaciones de unidades más elementales, que Gell-Mann denominó quarks en honor a una frase del libro de James Joyce *Finnegan's Wake*: "¡Tres quarks para Muster Mark!". Al principio se pensaba que sólo hay tres "sabores" básicos de quark: *up* (arriba), *down* (abajo) y *strange* (extraño), junto con sus antiquarks. Un cuarto "sabor", *charm* (encanto), propuesto

por Sheldon Lee Glasgow, introdujo el quark *charm* o encanto; más tarde se hicieron necesarios otros dos tipos de quark: *bottom* (inferior) y *top* (superior). El quark inferior *(b)*, el abajo *(d)* y el extraño *(s)* tienen cada uno de ellos una carga eléctrica de −1/3. El quark superior *(t)*, el arriba *(u)* y el encanto *(c)* tienen cada uno una carga de +2/3. En 1985 sólo queda sin confirmar experimentalmente el quark superior.

Además de los seis sabores, cada quark tiene otra propiedad denominada color. Existen tres colores, llamados normalmente rojo, azul y verde. Las propiedades de los quarks (color, encanto, etc.) han sido denominadas de manera caprichosa, desde luego, aunque sí existe similitud entre la mezcla de los colores primarios y la manera de combinarse de los quarks. Si se tiene en cuenta el color, hay dieciocho variedades de quark, cada una con su antiquark. Por ejemplo, un quark arriba rojo con una carga de +2/3 tiene un antiquark de carga −2/3 y que es anti-rojo y anti-arriba.

Las pruebas de la existencia del quark encanto recibieron un gran impulso en 1974, cuando se encontraron las primeras de una nueva familia de partículas que pueden ser explicadas mejor como un breve enlace de un quark encanto con su antiquark encanto. (Ya que el encanto se anula, la unión no resulta nada encantadora.) Estas partículas tienen una vida extraordinariamente breve (duran aproximadamente una diez milésima de una mil millonésima de segundo). Más adelante veremos cómo el efímero contacto del electrón y el positrón forma una pareja denominada positronio. Algunos físicos denominan *charmonium* a la nueva unión del quark encanto con su antipartícula. Otros han sugerido que se sustituya la denominación *charm* por la de *panda* (dada la conocida timidez del oso panda), por lo que la nueva sustancia se llamaría *pandemonium*.

La primera partícula de pandemonium fue encontrada simultáneamente por dos grupos de científicos de Estados Unidos: en el Oeste, en la Universidad de Stanford, y en el Este, en el Brookhaven National Laboratory de Nueva York. El grupo del Oeste llamó a la partícula J, y el de Este, psi. Pertenece a la familia de los mesones, y actualmente se la denomina J-psi. Todos los mesones se forman por el emparejamiento de un quark con su antiquark. Los bariones son combinaciones de tres quarks: *uud* para el protón, *udd* para el neutrón, etc.

En cuanto a los quarks en sí mismos, los físicos todavía los están buscando, sin encontrar ninguno. Tal vez la naturaleza de los

quarks sea tal que no pueden ser aislados de las partículas a las que están asociados. Un quark y su antiquark pueden ser comparados con los extremos de un trozo de cuerda. La cuerda existe en realidad, y también sus extremos, pero no se puede separar un extremo de la cuerda, de la misma manera que no se puede separar un polo de un imán. Otros teóricos piensan que los quarks son incluso menos reales que los extremos de un cuerda, que son entidades ficticias inventadas para hacer que las ecuaciones se resuelvan correctamente.

Los quarks pudieran resultar idénticos a un sistema de construcciones matemáticas debidas a Richard Feynman, quien las llama *partones*. Por su parte, Abdus Salam está promoviendo un "movimiento de liberación del quark", al que considera como entidad compuesta, formada por entes aún más pequeños, llamados prequarks o preones. Un grupo de físicos de Pekín ha propuesto un enfoque similar, que utiliza estratones, quién sabe si infinitamente encajados unos en otros, a modo de un juego de cajas chinas.

En la actualidad, los desarrollos más apasionantes que se están produciendo en la física teórica de partículas están relacionados con las grandes teorías de unificación (GTU), que aspiran a unir lo que parecen ser fuerzas independientes. Al principio se pensaba que la electricidad y el magnetismo eran independientes, y luego James Clerk Maxwell descubrió la manera de combinarlos para formar la fuerza única de electromagnetismo. En los años 70 Steven Weinberg y Abdus Salam, partiendo por separado de trabajos anteriores realizados por Glashow, lograron unificar el electromagnetismo y la fuerza débil. El campo unificador se llama actualmente campo electrodébil. (Los tres científicos compartieron un premio Nobel en 1979 por este trabajo.)

Ahora se está proponiendo una variedad desconcertante de teorías GTU, ideadas para unificar la fuerza débil con la fuerte, así como teorías más grandiosas aún, pensadas para unificar las cuatro fuerzas. Se supone que en los primeros momentos de la gran explosión reinaba la supersimetría y sólo existía una fuerza, una superfuerza llamada supergravedad. A medida que el Universo se iba expandiendo y enfriando, una serie de roturas de simetría dividió la superfuerza en las cuatro fuerzas conocidas: la gravedad, la fuerza fuerte, la fuerza débil y el electromagnetismo. En el capítulo 24 examinaremos brevemente una teoría popular de superfuerza que exige siete nuevas dimensiones espaciales.

Actualmente muchos físicos creen y esperan que dentro de po-

cas décadas todas las fuerzas y partículas puedan explicarse mediante una única teoría unificada. Otros no están tan seguros. Tienen la insistente sospecha de que le péndulo no dejará de oscilar, que la naturaleza será mucho más complicada. Pueden existir niveles interminables de microestructura que quedan por explorar, proporcionando cada nivel nuevas sorpresas. "No ha sido preciso", escribió Edward Teller en 1962 (en su libro *Our Nuclear Future*), atribuir al electrón una estructura interna. Añadió a esta frase una sola nota de pie de página: "Aún". Ahora en 1985, aún no.

Tal pulcro trío –protón, neutrón, electrón– no quedó firmemente establecido hasta 1932, cuando James Chadwick, en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, logró por fin capturar el neutrón[1]. Hacía mucho tiempo que se sospechaba su existencia, y los físicos exhalaron un suspiro de alivio cuando por fin fue identificado. Antes de terminar el año, sin embargo, su satisfacción recibió un duro golpe. Carl David Anderson, del Instituto de Tecnología de California, estaba examinando algunas fotografías de los rastros de los rayos cósmicos en la cámara de niebla cuando se encontró con la trayectoria de una partícula que debería ser un electrón, excepto en el hecho de que la trayectoria se curvaba en dirección errónea. Después de considerar y rechazar varias explicaciones de esta anomalía, Anderson concluyó finalmente que el rastro no podía haber sido hecho más que por un electrón de carga positiva. Le llamó *positrón*, y el nombre se ha mantenido.

El positrón fue la primera antipartícula descubierta. Se sabe ahora que todas las partículas elementales tienen su antipartícula correspondiente. Las dos partículas son iguales en todos los aspectos, excepto en que son opuestas en el signo de cualquier magnitud (representada por un número cuántico de signo más o menos) que se conserve. Si una partícula tiene carga, su antipartícula tiene una carga igual, sólo que contraria. Si tiene un momento magnético, su antipartícula tiene un momento magnético de signo contrario. El mesón K y el antimesón K no tienen carga ni momento magnético, pero son contrarios en los valores de otro número cuántico llamado extrañeza. En otras palabras, todas las magnitudes conservadas deben ser de signo contrario, de modo que cuando la partícula y la antipartícula se reúnen, estas cantidades se anulan una a otra sin dejar nada más que pura energía (fotones). En el caso del fotón y del mesón pi neutro, partícula y antipartícula son una y la misma.

Antes de que Anderson hiciera su descubrimiento, la mayoría de los físicos habían sido reacios a admitir que las antipartículas pu-

dieran existir. Había una notable excepción. Paul Adrien Maurice Dirac, uno de los físicos matemáticos más creadores de todos los tiempos, había propuesto una teoría de partículas de "hoyos", que predecía la existencia de antipartículas. Es imposible explicar la teoría de Dirac sin formulaciones matemáticas muy elevadas, pero podemos hacernos una tosca (muy tosca) idea fijándonos en los populares rompecabezas de bloques deslizantes de Sam Loyd. El objeto del rompecabezas es ir deslizando los pequeños cuadrados de acá para allá empujando constantemente un cuadrado para que entre en un hueco vacío, y de este modo obtener diversas disposiciones de números[2]. De la misma manera que los cuadraditos se mueven por "saltos cuánticos", discretos, de una posición a la contigua, lo mismo hacen los "hoyos". También éstos se mueven de una posición a la contigua, comportándose matemáticamente lo mismo que uno de los cuadrados. En realidad la teoría de rompecabezas se suele explicar considerando el hoyo como una "cosa" que se mueve dentro del marco.

La teoría de Dirac se parece al rompecabezas en la siguiente forma. Supone que el espacio vacío no está realmente vacío: es un vasto y compacto mar de partículas, todas ellas con masa inerte negativa. (Esto significa que si una fuerza actúa sobre una de las partículas la mueve en dirección *opuesta* a aquella en que actúa la fuerza.) En ciertas condiciones una partícula puede ser desalojada de tal mar y elevada, por así decirlo, a un nivel situado fuera del mar. Cuando así sucede, se produce una creación par de dos tipos de electrones, ambos con masa inerte positiva. Uno es el electrón ordinario con su carga negativa; el otro es el "hoyo" que deja en el mar. El agujero es una "cosa" en el mismo sentido que lo son una burbuja que se mueve en un líquido, o el agujero que se mueve en el rompecabezas de Sam Loyd[3]. En la teoría de Dirac se comportaría como un electrón con carga positiva. "Sería –escribió Dirac en 1931– una nueva clase de partícula, desconocida de la física experimental, con la misma masa y carga contraria que las de un electrón. Podríamos llamar a esta partícula un anti-electrón."

El antielectrón, proseguía Dirac, no duraría mucho tiempo en este mundo. Se "movería" durante un breve instante (al ir cambiando de posición las restantes partículas del mar), hasta que un electrón cayera en el hoyo y se produjera la destrucción simultánea del par. Ambas partículas se aniquilarían mutuamente y desaparecerían. De modo análogo, razonaba Dirac, los protones dispondrían de su propio mar de partículas densamente empaquetadas. En ciertas

circunstancias, una de estas partículas sería expulsada de tal mar, para convertirse en un verdadero protón, dejando un hoyo de carga negativa, que se comportaría como un antiprotón.

¡Todo esto en 1931! ¿Conocía Anderson la notable teoría de Dirac? No, no la conocía. En efecto, cuando supo de ella y la leyó, después de su descubrimiento del positrón, confesó que no la había comprendido por completo. Así, pues, a su modo, Anderson tuvo tanta perspicacia y tanto denuedo como Dirac. Aún sin justificación teórica, había observado el trazo extraño en su famosa fotografía de la cámara de niebla, y concluido que la evidencia no podía ser explicada por la teoría tradicional. Era el inconfundible trazo de un electrón positivo.

Otros físicos se apresuraron a confirmar el descubrimiento de Anderson. Durante unos meses, en muchos laboratorios, núcleos atómicos fueron bombardeados con rayos gamma para producir pares de electrones y positrones. Como había predicho Dirac, el positrón es de vida corta. Tan pronto como encuentra un electrón (y hay profusión de electrones alrededor para chocar con ellos) se produce la aniquilación mutua del par. Más tarde se descubrió que justo antes de que las dos partículas se destruyan una a otra, giran alrededor de un centro común creando durante un fugaz instante un átomo de lo que los físicos llaman *positronio*. Una rápida danza de la muerte y después ¡puf! Las dos partículas se esfuman emitiendo rayos gamma de dos o tres fotones, dependiendo su número de si el par danzaba con sus ejes magnéticos paralelos (señalando los polos norte en la misma dirección) o antiparalelos (con los polos norte señalando en direcciones opuestas).

La teoría de Dirac, como hemos visto, predecía también un antiprotón. Éste únicamente podría ser creado en combinación con un protón, y sería aniquilado tan pronto como encontrase otro protón. Veintitrés años después del descubrimiento del antielectrón por Anderson, en 1955, un grupo de físicos de la Universidad de Berkeley, en California, empleando un potente acelerador, logró crear el primer par protón-antiprotón[4]. La pareja se comportó tal como Dirac había dicho.

Un año después, en 1956, los científicos de Berkeley, cuando trabajaban con el bevatrón, identificaron por primera vez un antineutrón. Aunque el neutrón no tiene carga eléctrica, tiene spin y momento magnético. Cómo puede tener el neutrón campo magnético sin tener carga eléctrica, es todavía un misterio, porque los campos magnéticos se engendran tan sólo por cargas que se mue-

ven. Hay varias teorías para explicarlo. Por ejemplo, el neutrón puede ser una estructura complicada en la cual una partícula con carga negativa circula alrededor de un núcleo con carga positiva, que puede ser un protón ordinario. Las dos cargas se anulan mutuamente, pero la carga negativa en movimiento induce un campo magnético. Recientes experimentos han puesto en duda esta teoría. Una idea mejor es que el núcleo del neutrón carece de carga, pero a su alrededor circula un número igual de partículas positivas y negativas. Si las partículas positivas circulan en una dirección y las negativas en la otra, sus ejes magnéticos apuntarán en la misma dirección para crear un campo magnético global. Como vimos antes, la teoría de los quarks supone que el neutrón contiene un quark arriba, con una carga de +2/3, y dos quarks abajo, cada uno de ellos con una carga de −1/3, por lo que la carga global es cero.

Desde 1956, los físicos han encontrado que toda partícula elemental, con las dos excepciones antes citadas (el fotón y el pi mesón neutro), tiene su antipartícula gemela. Tan pronto se hizo evidente que las tres partículas de materia ordinaria (protón, neutrón y electrón) tenían antipartículas, los físicos se preguntaron: ¿Por qué no antimateria? Un átomo de antihidrógeno tendría como núcleo un antiprotón, alrededor del cual circularía un positrón (antielectrón), de carga positiva.

El antideuterio, el isótopo más sencillo del antihidrógeno, tendría una estructura similar, excepto que el antinúcleo contendría también un antineutrón. Y lo mismo respecto a todos los demás elementos. Cada antiátomo sería exactamente igual a un átomo, excepto en que estaría constituido por antipartículas en vez de partículas. No hay razón para que los antiátomos no pudieran enlazarse en antimoléculas para formar antielementos y anticompuestos que serían homólogos exactos de los que conocemos. La "antiagua" estaría formada por la unión de dos antiátomos de hidrógeno y un antiátomo de oxígeno.

En los días en que escribimos esto, ni un solo antiátomo de antimateria ha sido descubierto o creado en el laboratorio[5], pero los físicos no ven razones teóricas para que tal materia no pueda existir. Por supuesto, en el instante en que un trozo de antimateria entrase en contacto con la materia, se produciría una explosión. De hecho, la explosión sería mucho más potente que las explosiones de las bombas atómicas o de hidrógeno. En las explosiones de estas bombas únicamente parte de la masa de la sustancia implicada se convierte en energía. Pero si la materia se combina con antimateria, virtualmente *toda* la masa se convierte en energía. Primero se producirían mesones pi y otras partículas; entonces estas partículas se degradarían inmediatamente en neutrinos y en radiación, que dejaría la escena con la velocidad de la luz. Sería la explosión definitiva.

La ciencia no ha encontrado todavía un modo de volar la Tierra entera y hacerla añicos. Sería fácil destruir toda la vida en el planeta (por diversidad de técnicas), pero la fuerza para desintegrar la Tierra misma no ha sido descubierta todavía. Podría disponerse de esta fuerza si la antimateria pudiera ser creada en cantidades bastante grandes. (Para evitar la explosión inmediata habría que tenerla suspendida en un vacío, aislada de la materia.) ¿Son los asteroides, los millares de trozos de roca que circulan en torno al Sol entre las órbitas de Marte y Júpiter, los residuos de un planeta cuyos científicos acabaron por descubrir cómo hacer antimateria? Acaso es parte del vasto plan cósmico de Dios permitir que la vida evolucione sobre millones de planetas con la esperanza de que en alguna parte del Universo se desarrollen criaturas inteligentes que sean capaces de descubrir los secretos de la materia sin enviarse a sí mismos a la eternidad. El planeta situado justo más allá de Marte suspendió el examen. La Tierra está ahora al borde de la gran prueba.

Naturalmente, todo esto es agua pasada para los devotos de la ciencia-ficción. En cuanto los físicos predijeron la antimateria, los escritores de ciencia-ficción comenzaron a jugar con la idea. (Al principio la llamaban materia "contraterrena", pero el término está ahora anticuado.) Un muchacho se reúne con una antimuchacha, el beso, el fin. La novela de James Blish *The Triumph of Time* (Avon, 1958) está hilvanada en torno al tema de la antimateria. Es evidente que nuestra galaxia debe estar constituida por completo de materia, pero, separadas de nuestra galaxia por inconcebibles distancias, hay otras galaxias. ¿No estarán algunas hechas de antimateria? No hay manera de saberlo por la luz que nos envían, a causa de que el cuanto de luz, el fotón, es idéntico a su antipartícula. Cualquier antipartícula salida de una antigalaxia sería aniquilada mucho antes de llegar cerca de la Tierra (excepto posiblemente los antineutrinos, con los que nos encontraremos en el capítulo 23).

En la constelación del Cisne hay dos galaxias que parecen pasar una a través de otra y que están emitiendo una radiación de energía mucho mayor de lo previsto. Algunos astrónomos se han preguntado si estamos viendo la colisión de una galaxia y una antigalaxia. Otros astrónomos no lo creen así. Se ha sugerido que meteoros de antimateria pueden chocar ocasionalmente con la Tierra como el

objeto misterioso que estalló en Siberia, el 30 de junio de 1908, produciendo una monstruosa explosión, pero sin dejar rastros de fragmentos meteóricos. Parece improbable. Se cree que todos los meteoros proceden de nuestra galaxia y, por tanto, estarían hechos de materia ordinaria.

La posibilidad de crear pequeñas cantidades de antimateria para usarla como combustible en las naves espaciales ha sido tomada completamente en serio por los físicos, aunque hasta el presente no se tiene idea de cómo conseguirlo. Sería, desde luego, una especie de combustible definitivo. Es presumible que el antihierro podría ser imantado y mantenerlo suspendido en un vacío mediante campos magnéticos, y entonces por algún método ingenioso hacerlo combinarse lentamente con el hierro ordinario.

En 1956, el diario *San Francisco Chronicle* reseñaba una conferencia de Edward Teller, en la cual el famoso físico analizaba la antimateria y el hecho de que ésta haría explosión en contacto con la materia ordinaria. Esto inspiró al físico Harold P. Furth del Lawrence Radiation Laboratory, un poema: "Peligros de la vida moderna", que publicó *The New Yorker,* en la pág. 50 del número de 10 de noviembre de 1956:

Mucho más allá de la troposfera
hay una región pura y estelar
donde en una faja de antimetría
vivía el doctor Edward Anti-Teller.
Distante del origen de la Fusión.
Vivía despreocupado e inadvertido
con todos sus antiparientes y amigos,
y tenía cuero de Macassar en sus sillas.
Una mañana, vagando a la orilla del mar,
vio un cacharro de monstruoso tamaño
que ostentaba tres letras: A. E. C.,
del que saltó un visitante de la Tierra.
Entonces, gritando alegremente sobre la arena,
se encontraron dos que en sus extrañas maneras
eran como lentejas. Sus manos derechas
se estrecharon, y el resto fue rayos gamma.

Ejercicio 15: *Como veremos en el capítulo 23, se cree ahora que la antimateria implica, además de la inversión de las cargas y ejes*

magnéticos, una inversión de derecha a izquierda. Suponiendo que Teller y Anti-Teller sean exactamente enantiomorfos, describir las interpretaciones posibles que se puedan dar a la frase "Se estrecharon las manos derechas".

La respuesta del doctor Teller al poema fue una divertida carta que apareció en el *New Yorker* del 15 de diciembre de 1956, páginas 164 a 166:

Universidad de California, Laboratorio de Radiación Berkeley, California, 26 noviembre 1956.

A los editores de *The New Yorker.*

Muy señores míos:

En un número reciente de *The New Yorker* leo el siguiente poema describiendo el encuentro del doctor Edward Anti-Teller con una persona imaginaria que se diferenciaba del Anti-Teller únicamente en las cargas transportadas por las partículas de su cuerpo. (Aquí se reproducía el poema.)

El encuentro, tal como se describe, es interesante y me tienta a ofrecer algunos detalles científicos.

No creo que Anti-Teller viva en nuestra galaxia, puesto que no es probable que existan anti-estrellas o anti-planetas en nuestro sistema de la Vía Láctea. Por otra parte, las antigalaxias pueden existir. La cuestión principal es cómo llegar allí y lo que se espera a la llegada. (Yo no me preocupo de la mecánica del viaje espacial. Todos los niños saben que se puede hacer.)

La distancia crea algún obstáculo. La luz tarda más de un millón de años en alcanzar la nebulosa espiral más cercana. Afortunadamente, Einstein demostró que un millón de años parecerá sólo unos cuantos años si se viaja lo bastante rápido, de modo que un explorador puede llegar durante su vida, aunque no durante la vida de los amigos que ha dejado en la Tierra. Cuando se aproxime a la anti-galaxia será atraído por la anti-gravedad. En efecto, gravedad y anti-gravedad son la misma cosa. Algunos pueden no estar conformes, pero si vuelven a reflexionar sobre ello verán que están equivocados.

Cuando el viajero entre en la anti-galaxia, su nave será bombardeada por antipartículas. Este bombardeo calentará la nave espa-

cial. El viajero no debe llegar a la velocidad límite (que es la velocidad de la luz), o su nave se fundirá. Aún más, la radiación resultante le matará antes de haber penetrado ni siquiera una millonésima de la anti-galaxia. Pero no nos rindamos: Anti-Teller puede vivir cerca del borde de la anti-galaxia.

A una distancia de doscientas millas de la superficie de la anti-Tierra, el intruso seguramente morirá por la radiación aniquiladora que se producirá cuando la nave espacial comience a sumergirse en la anti-atmósfera. Únicamente un milagro o un inesperado desarrollo en la biofísica puede sarvarle. Antes de descender a una altitud de cien millas, la nave espacial se desplomará, y *nada* podrá salvarle.

Pero convengamos una reunión entre Teller y Anti-Teller en un sitio verdaderamente neutral: en el espacio. Si van vestidos apropiadamente (traje espacial y traje anti-espacial, respectivamente), y si evitan cuidadosamente que se escapen algunas moléculas o anti-moléculas, pueden aproximarse sin peligro. Pueden verse mutuamente sin inconveniente porque la luz y la anti-luz son lo mismo. Sin embargo, al contacto se producirá una violenta explosión. Partes de Teller y de Anti-Teller producirán una serie de partículas efímeras (conocidas como mesones, hiperones y anti-hiperones), y un gran número de productos más estables, tales como fragmentos nucleares, fragmentos antinucleares, electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y rayos gamma. El resto escaparía en dirección opuesta como vapor y anti-vapor. Todo esto ocurriría más rápido que el anti-pensamiento, que probablemente es lo mismo que pensamiento.

A pesar de esta desgraciada perspectiva, me ha complacido que el *The New Yorker* me haya mencionado. Aunque, mirándolo bien, sólo Anti-Teller era mencionado por su nombre en el poema, pero confío que en algún lado de una anti-galaxia *The Anti-New Yorker* dedique unas líneas amables a

Su afectísimo,

Edward Teller.

Es importante comprender que el descubrimiento de las anti-partículas no infringe en absoluto la ley de paridad. Como hemos visto, la distinción entre los polos norte y sur de los campos magnéticos no lleva a la solución del problema de Ozma, es decir, no indica ninguna preferencia fundamental de la naturaleza por la derecha o la izquierda. De la misma manera la distinción entre carga negativa y positiva no indica ninguna preferencia derecha-izquierda. Como polo norte y polo sur, carga positiva y negativa, son simplemente etiquetas convencionales para designar dos estados opuestos de carga eléctrica. Ahora la fuerza magnética se "entiende" en el sentido de que se reduce a un campo de fuerza creado por el movimiento de una carga eléctrica, y hemos visto cómo la dirección del spin de esas cargas explica la diferencia entre los dos extremos de un eje magnético. Por qué la carga eléctrica se divide en los dos estados de positiva y negativa, es todavía un misterio.

Las dos cargas se distinguen entre sí por el hecho de que cargas contrarias se atraen y cargas iguales se repelen. Todas las partículas conocidas tienen una carga eléctrica negativa de un cuanto, o una carga positiva de un cuanto, o ninguna carga en absoluto. (En la mecánica cuántica la carga es expresada por los números cuánticos +1, −1 y 0.) Lo que representan estos números nadie lo conoce exactamente. La cuestión a destacar aquí es que estas denominaciones describen una situación que no implica en absoluto la violación de la simetría derecha-izquierda.

Sin embargo, si tenemos en cuenta las cargas eléctricas y los ejes magnéticos, podemos trazar un diagrama de una partícula y su antipartícula de modo que cada una parezca la imagen especular de la otra. Por ejemplo, en la figura 60 se representan los diagramas de un electrón y un positrón. En la figura 61, los diagramas de un protón y un antiprotón. No son más que modelos simbólicos de una

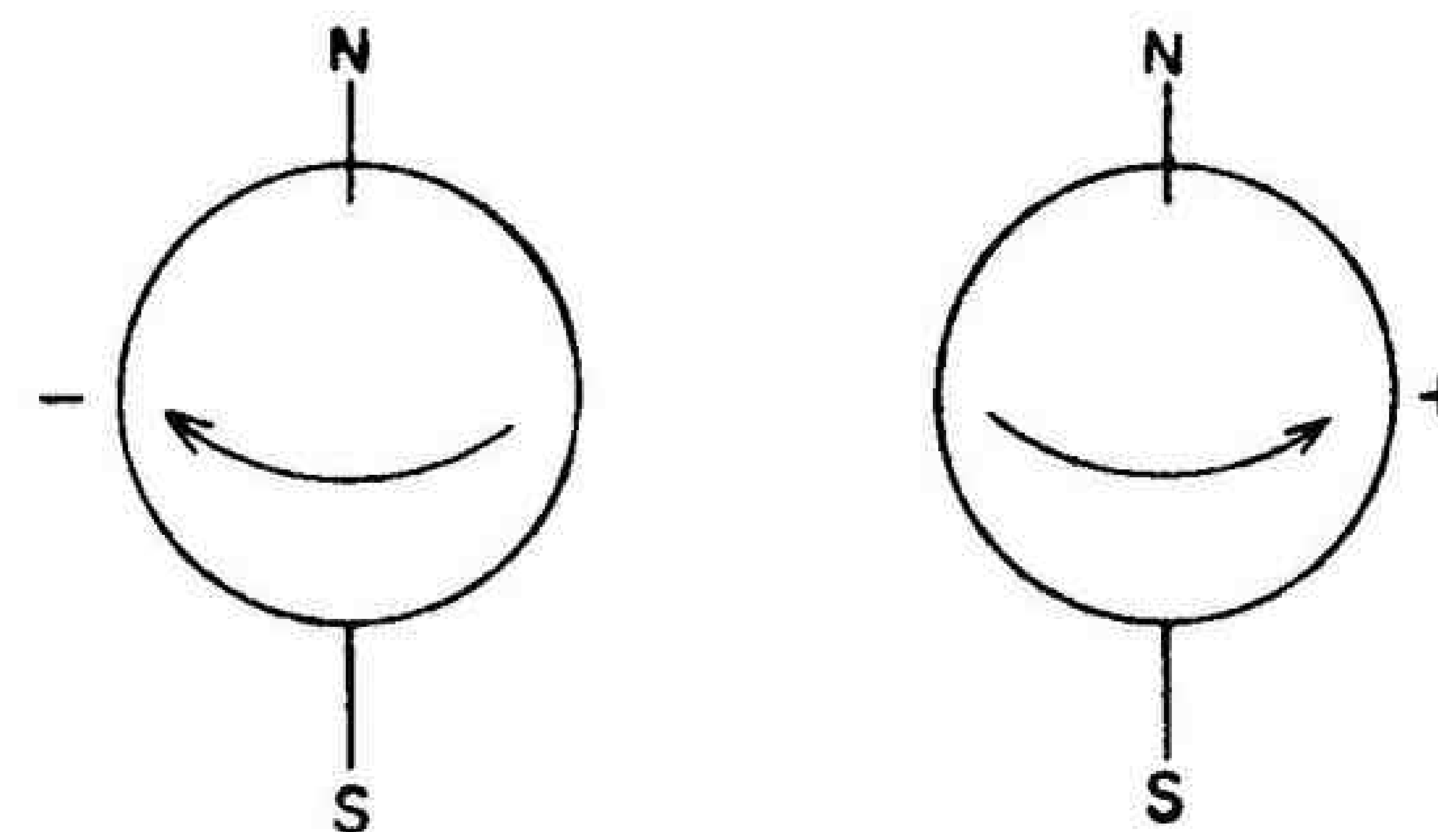


Fig. 60. Diagramas del electrón (izquierda) y del positrón (derecha).

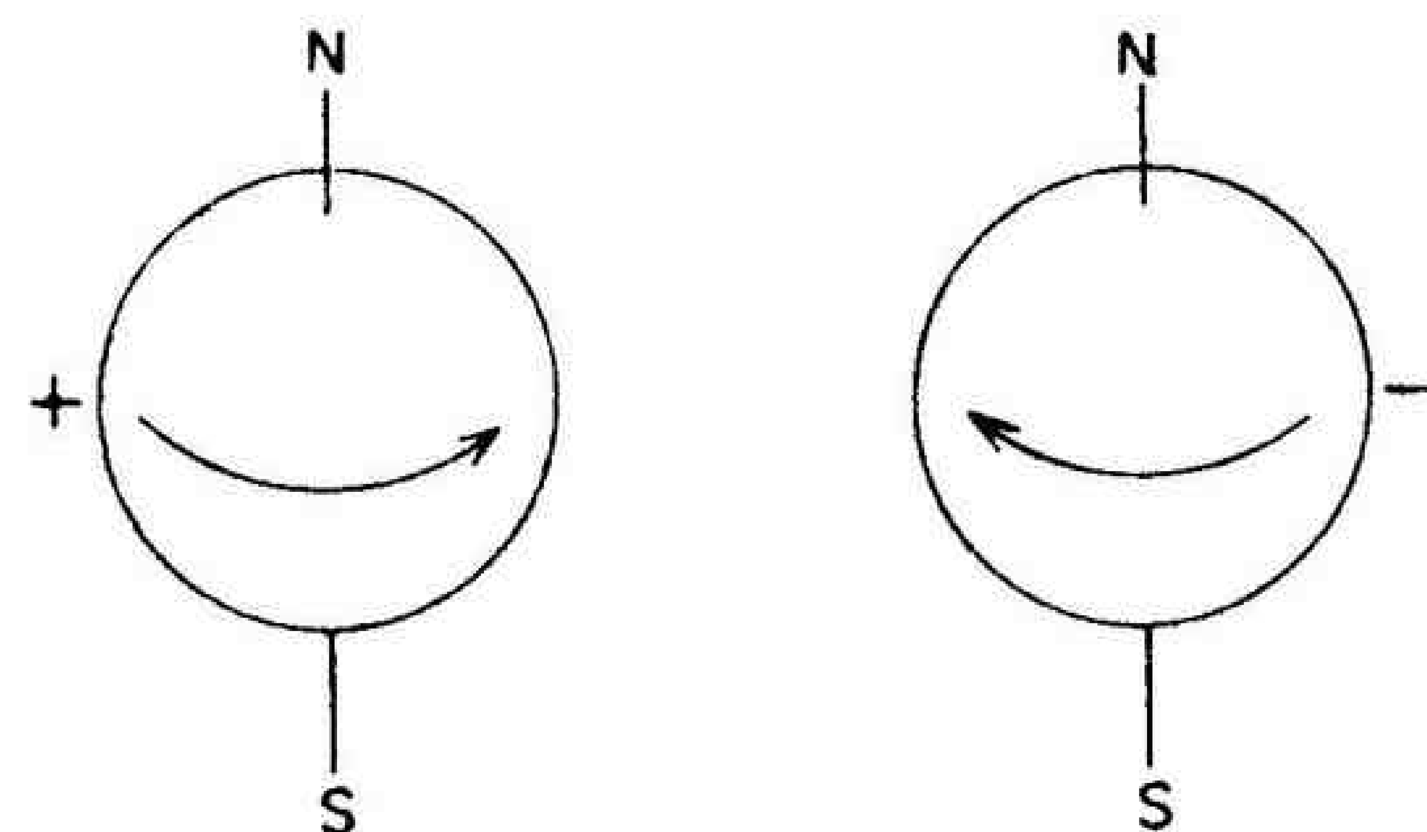


Fig. 61. Diagramas del protón (izquierda) y del antiprotón (derecha).

situación que únicamente puede expresarse con precisión mediante funciones de onda de la mecánica cuántica. Sin embargo, lo mismo que los diagramas de las moléculas en los cuales se ve a los átomos unidos por enlaces químicos, esos dibujos esquemáticos son enormemente útiles, y a menudo sugieren posibilidades teóricas.

Al mirar estos diagramas se tiene inmediatamente esta idea: acaso la antipartícula sea en realidad reflexión especular de una partícula. La única diferencia entre la partícula derecha e izquierda de cada dibujo es que una tiene carga positiva y la otra carga negativa. ¿Puede ser que la distinción entre carga positiva y negativa descanse, de modo hoy desconocido, en una especie de estructura espacial asimétrica en la partícula misma? ¿Revelarán investigaciones futuras sobre la estructura del electrón (no posibles "todavía" como nos recuerda Teller en la nota al pie citada), algún tipo determinado de verdadera asimetría espacial, lo mismo que las investigaciones de los químicos en el siglo pasado descubrieron que los isómeros ópticos de Pasteur eran fieles imágenes especulares uno de otro? ¿Se recuerda cómo el colega van't Hoff desechaba desdeñosamente sus especulaciones sobre esta cuestión, calificándolas de "miserable filosofía especulativa"?

Pasteur y van't Hoff tuvieron fuertes intuiciones, que descansaban en la misma perspicacia que la perplejidad de Kant al pensar en sus orejas. ¿Cómo pueden ser dos cosas exactamente iguales en todos los aspectos y, sin embargo, diferentes de alguna manera? Los diagramas de reflexión especular sugieren una posible respuesta: *son* realmente iguales, excepto que uno de ellos, de algún modo, "va del otro lado".

Aun después del descubrimiento de las antipartículas, los físicos no tomaron seriamente en consideración la idea de que una antipartícula pudiera ser una fiel imagen especular de una estructura asimétrica desconocida. La razón era sencilla: Si existiera una asimetría espacial de cualquier clase en la estructura de las partículas, sin duda se manifestaría en algún tipo de violación de la paridad. Es decir, no tendría que haber un experimento en el que la asimetría de una partícula condujera a algún tipo de asimetría *mensurable* (y no solamente simbólica o esquemática); una desviación mensurable hacia la derecha o la izquierda, una lateralidad medible. No se sabía de ningún experimento así. La paridad se conservaba siempre.

Más tarde, en los años de 1954 a 1956, se produjo una situación curiosa respecto a dos partículas llamadas mesón theta y mesón tau. Este rompecabezas, como fue llamado, llevó a la violación de la paridad: se trata de una historia excitante, que relatamos en el capítulo siguiente.

22. La violación de la paridad

Como todo el mundo sabe hoy, todos los acontecimientos que tienen lugar en el Universo están gobernados por cuatro tipos fundamentales de fuerzas. (Los físicos prefieren decir "interacciones" en lugar de "fuerzas", pero no hay inconveniente en emplear aquí el término más corriente):

1. Fuerza nuclear.
2. Fuerza electromagnética.
3. Fuerza de interacción débil.
4. Fuerza gravitatoria.

La más potente, la fuerza nuclear, es la fuerza que mantiene juntos a protones y neutrones en el núcleo de un átomo. Se la suele llamar la fuerza cohesionadora del núcleo. El electromagnetismo es la fuerza que une los electrones al núcleo, los átomos en las moléculas y las moléculas en los sólidos y los líquidos. La gravitación, como todos sabemos, es la fuerza por la cual una masa atrae a otra masa; es la fuerza principalmente responsable de que se mantengan juntas las sustancias que constituyen la Tierra. La fuerza gravitatoria es tan débil que a menos de que una masa sea enormemente grande resulta difícil medirla. Al nivel de las partículas elementales su influencia es despreciable. La fuerza restante, la que interviene en las "interacciones débiles", es la fuerza sobre la cual se sabe menos. Que tal fuerza debe existir está indicado por el hecho de que en ciertas interacciones de degradación que implican partículas (tal como la degradación beta, en la cual electrones o positrones son expelidos por los núcleos radiactivos), la velocidad de la reacción es mucho más lenta que si fueran responsables las fuerzas nucleares o electromagnéticas. Se considera "lenta" una reacción, por ejemplo, de una diezmilmillonésima de segundo. Para un físico nuclear éste

es un efecto sumamente perezoso –la velocidad de las reacciones en que interviene la fuerza nuclear es de diezbillonésimas–. Para explicar esta pereza ha sido necesario suponer una fuerza más débil que el electromagnetismo, pero más potente que la fuerza sumamente débil de la gravedad.

El enigma "theta tau", sobre el cual los físicos se rompieron la cabeza, en 1956, surgió en conexión con una débil interacción que implica una "extraña partícula" llamada mesón K. (Las partículas extrañas son una clase de partículas recientemente descubiertas, llamadas "extrañas" porque no parecen ajustarse en nada a ninguna de las otras partículas.) Parecía haber dos tipos distintos de mesones K. Uno, llamado el mesón theta, se degrada en dos mesones pi. El otro, llamado el mesón tau, se degrada en tres mesones pi. Sin embargo, los dos tipos de mesones K no son distinguibles uno de otro. Tienen precisamente la misma masa, la misma carga, el mismo tiempo de vida. A los físicos les hubiera gustado decir que había solamente un mesón K, que a veces se degrada en dos, a veces en tres, mesones pi. ¿Por qué no lo hicieron? Porque habría significado que la paridad no se conservaba. El mesón theta tiene una paridad par. Un mesón pi tiene una paridad impar. Los dos mesones pi tienen una paridad total que es par; así, pues, la paridad se conserva en la degradación del mesón theta. Pero los *tres* mesones pi tienen una paridad total que es impar.

Los físicos quedaron perplejos ante un dilema con las siguientes disyuntivas:

1. Se podría suponer que los dos mesones K, aunque indiferenciables en sus propiedades, eran en realidad dos partículas distintas: el mesón theta con paridad par y el mesón tau con paridad impar.
2. Se podría suponer que en una de las reacciones de degradación la paridad no se conservaba.

Para la mayoría de los físicos de 1956, la segunda suposición era casi impensable. Como hemos visto en el capítulo 20, habría significado admitir que la simetría derecha-izquierda de la naturaleza se infringía, que la naturaleza mostraba una tendencia a un tipo de "mano". La conservación de la paridad había sido bien establecida en todas las interacciones "fuertes" (esto es, en las interacciones nucleares y electromagnéticas). Había sido concepto fecundo en la mecánica cuántica durante treinta años.

En abril de 1956, durante una conferencia sobre física nuclear en la Universidad de Rochester, en Nueva York, se entabló una viva discusión sobre el enigma theta-tau. Richard Phillips Feynman[1], un

físico del Instituto de Tecnología de California, planteó la cuestión: ¿Queda infringida la ley de paridad algunas veces? En mi correspondencia con Feynman me ha dado algunos detalles de esta cuestión histórica. Son dignos de recogerlos.

La cuestión había sido sugerida a Feynman la noche antes por Martin Block, un físico experimental que compartía con Feynman la habitación del hotel. La respuesta al enigma theta-tau –dijo Block– puede ser muy sencilla. Acaso la preciosa ley de paridad no se sostiene siempre. Feynman respondió señalando que si eso fuera verdad habría una manera de distinguir la izquierda de la derecha. Sería sorprendente, dijo Feynman, pero no podría pensar de ninguna manera que tal idea se contradijera con los resultados experimentales conocidos. Prometió Block que plantearía el problema en la reunión del día siguiente, para ver si alguno podía encontrar algo erróneo en la idea. Así lo hizo, comenzando sus observaciones diciendo: "Estoy formulando esta pregunta en nombre de Martin Block." Consideraba la idea tan interesante que si resultaba verdad deseaba que el mérito fuera para Block.

Chen Ning Yang y su amigo Tsung Dao Lee, dos jóvenes y brillantes físicos nacidos en China, estaban presentes en la reunión. Uno de ellos dio una larga respuesta a la pregunta de Feynman.

"¿Qué dijo?", preguntó más tarde Block a Feynman.

"No sé –replicó Feynman–, no he podido comprenderlo."

"Más tarde –escribió Feynman– la gente se metió conmigo diciéndome que mis primeras palabras sobre Martin Block obedecían a que temía verme asociado a una idea tan descabellada. La idea me pareció inverosímil, aunque posible, y como posibilidad, apasionante. Algunos meses después Norman Ramsey, un experimentador, me preguntó si yo creía que le valdría la pena hacer un experimento a fin de comprobar si la paridad se infringía en la degradación beta. Yo le dije decididamente que sí, porque aunque estaba seguro de que *no* se violaría la paridad, había una posibilidad de que sucediera, y era importante comprobarlo. '¿Apuesta usted cien dólares contra un dólar a que la paridad se conserva?' –me preguntó. 'No, pero cincuenta dólares, sí.' 'A mí me bastan. Acepto su envite. Haré el experimento', contestó Ramsey. Desgraciadamente, Ramsey no tuvo tiempo para hacerlo entonces, pero mi cheque de cincuenta dólares puede que le hubiera compensado, aunque ligeramente, de haber perdido una oportunidad."

Durante el verano de 1956, Lee y Yang reflexionaron algo más sobre la cuestión. A principios de mayo, cuando estaban sentados

en el café "White Rose", cerca de la esquina de Broadway y la calle 125, en las proximidades de la Universidad de Columbia, se les ocurrió que podía ser provechoso hacer un cuidadoso estudio de los experimentos conocidos que implican interacciones débiles. Así lo hicieron durante varias semanas. Con asombro encontraron que, aunque la evidencia de la conservación de la paridad era fuerte en las interacciones fuertes, no había prueba ninguna de ello en las débiles. Además pensaron en varias pruebas definitivas, que implicasen débiles interacciones, que podrían zanjar la cuestión en una forma u otra. El resultado de sus trabajos fue su ensayo *Question of Parity Conservation in Weak Interaction,* ahora ya clásico.

"Para decidir inequívocamente si la paridad se conserva en las interacciones débiles –decían–, se debe realizar un experimento para determinar si las interacciones débiles diferencian la derecha de la izquierda. Se examinarán algunos de tales posibles experimentos."

La publicación de su trabajo en *The Physical Review* (1 octubre 1956) no suscitó más que un ligero interés entre los físicos nucleares. Parecía tan improbable que se infringiera la paridad, que la mayoría de los físicos tomaron esta actitud: Que otro sea quien haga la prueba. Freeman J. Dyson, un físico que está ahora en el Institute for Advanced Study de Princeton, al escribir sobre "innovación en la física" *(Scientific American,* septiembre 1958), dijo estas honradas palabras sobre lo que llamaba la "ceguera" de la mayoría de sus colegas:

"Me enviaron un ejemplar (del trabajo de Lee y Yang) y lo leí. Lo leí dos veces. Yo dije: 'Esto es sumamente interesante', u otras palabras parecidas. Pero no tuve imaginación para decir: 'Por Dios, si esto es verdad, abre una rama completamente nueva de la física.' Y creo que otros físicos, con pocas excepciones, eran en aquel tiempo tan imaginativos como yo."

Varios físicos fueron aguijoneados por las sugerencias de Lee y Yang. El primero que recogió el guante fue la Dra. Chien-Shiug Wu, una profesora de física de la Universidad de Columbia, reconocida por todos como una de las más distinguidas especialistas del mundo. Ya era famosa por sus trabajos sobre las interacciones débiles y por el cuidado y la elegancia con que siempre realizaba sus experimentos. Como sus amigos Yang y Lee, también había nacido en China, y se había trasladado a los Estados Unidos para continuar su carrera.

El experimento planeado por la Dra. Wu implicaba la degradación beta del cobalto 60, un isótopo del cobalto altamente radiacti-

vo, que emite continuamente electrones. En el modelo atómico de Bohr, un núcleo de cobalto 60 puede imaginarse como una pequeña esfera que gira como un trompo en torno a un eje cuyos extremos se señalan como norte y sur para indicar los polos magnéticos. Las partículas beta (electrones) emitidas en la interacción débil de la degradación beta son despedidas de los dos extremos norte y sur de los núcleos; normalmente los núcleos apuntan en todas las direcciones, de modo que los electrones son emitidos en todas las direcciones. Pero cuando se enfría el cobalto 60 a cerca del cero absoluto (–273 grados centígrados) para reducir la vibración de sus moléculas, producidas por el calor, es posible aplicar un potente campo electromagnético que inducirá a más de la mitad de los núcleos a alinearse con sus extremos norte señalando en la misma dirección. Los núcleos continúan emitiendo sus electrones. En lugar de ser dispersados en todas las direcciones, sin embargo, los electrones se concentran ahora en dos: la dirección a que están apuntando los extremos norte de los ejes magnéticos y la dirección a que apuntan los extremos sur. Si la ley de la paridad no queda infringida, habrá tantos electrones que siguen una dirección como la otra.

Para enfriar el cobalto hasta cerca del cero absoluto, la Dra. Wu necesitó las instalaciones del National Bureau of Standards, de Washington, D. C. Allí fue donde ella y sus colegas comenzaron los históricos experimentos. Si el número de electrones se divide igualmente en dos grupos, los que son emitidos al norte y los emitidos al sur, se conserva la ley de la paridad. El enigma theta-tau sigue siendo un enigma. Si el proceso de la degradación beta muestra una lateralidad, es decir, un número de electrones emitidos en una dirección mayor que el de los emitidos en la otra, la paridad quedaría derrocada. Una nueva era revolucionaria en la teoría cuántica se pondría en marcha.

En Zurich, uno de los físicos teóricos más grandes, Wolfgang Pauli, esperaba ansiosamente los resultados de la prueba. En una carta, ahora famosa, a uno de sus antiguos discípulos, Victor Frederick Weisskopf (entonces en el Instituto de Tecnología de Massachusetts), Pauli escribió: "Yo *no* creo que el Señor sea un torpe zurdo y estoy dispuesto a apostar una suma muy alta a que la experiencia dará resultados simétricos."

Si Pauli (que murió en 1958) hizo realmente la apuesta (como Feynman), no se sabe. Si la hizo, también perdió. Los electrones, en el experimento de madame Wu, no eran emitidos por igual en ambas direcciones. La mayoría eran emitidos desde el extremo sur;

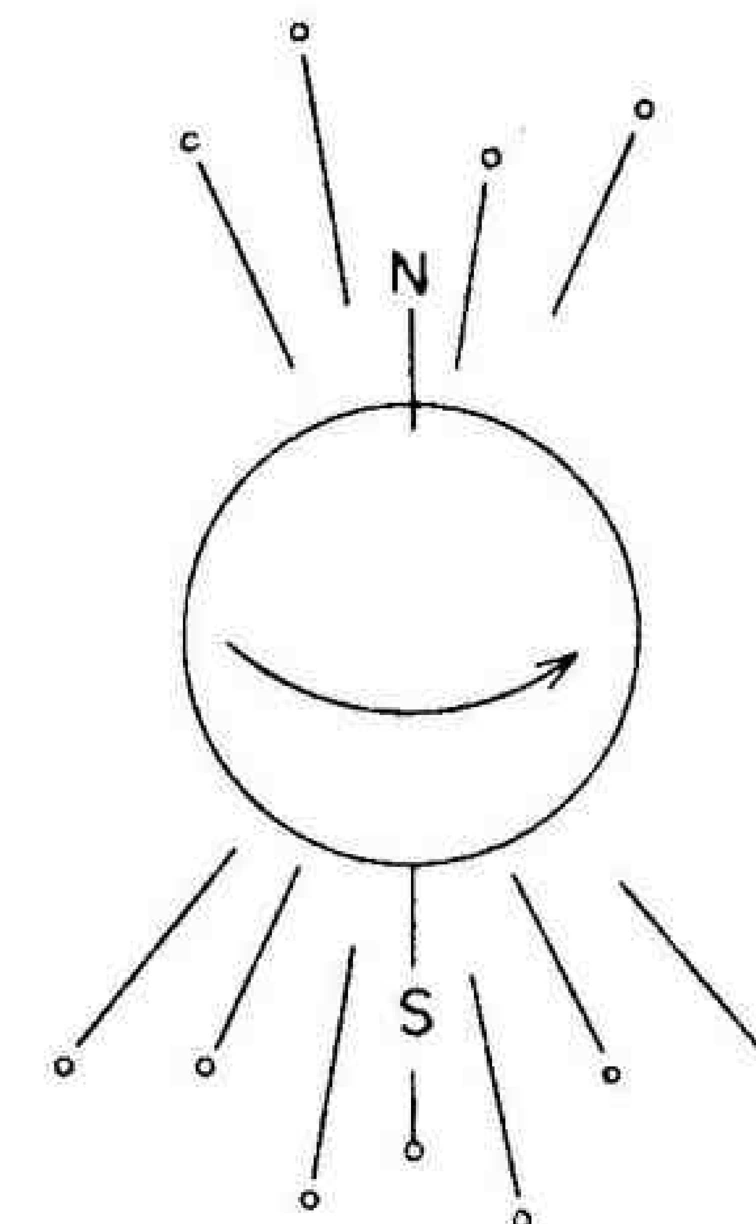


Fig. 62. Es más probable que un electrón sea emitido del extremo sur de un núcleo de cobalto 60 que del extremo norte.

esto es, el extremo hacia el cual una mayoría de los núcleos del cobalto 60 apuntaban sus polos sur.

A riesgo de repetirme y posiblemente aburrir a los lectores que vean inmediatamente todas las consecuencias de este resultado, hagamos una pausa para asegurarnos de que comprendemos exactamente por qué el experimento de madame Wu era tan revolucionario. Es cierto que el *dibujo* (figura 62) que representa el núcleo del cobalto 60, girando en una cierta dirección en torno a su eje denominado N y S, es una estructura asimétrica no superponible a su imagen especular. Pero esto no es más que un dibujo. Como sabemos, las denominaciones N y S son puramente convencionales. No hay nada que impida trocarse el N y el S de todos los campos magnéticos del Universo. Los extremos norte de los núcleos de cobalto 60 se convertirían en sur, y los extremos sur en norte, y un intercambio similar de polos ocurriría en el campo electromagnético empleado para alinear los núcleos. Todo antes del experimento de madame Wu indicaba que tal conmutación de los polos no produciría un cambio mensurable en la situación experimental. Si hubiera una diferencia intrínseca, observable entre los polos –uno rojo y otro verde, o uno fuerte y otro débil–, entonces la designación de N y S sería más que una convención. Los núcleos de cobalto poseerían una verdadera asimetría espacial. Pero los físicos no conocían nin-

guna manera de diferenciar los polos, excepto probando su reacción a otros ejes magnéticos. De hecho, como ya hemos visto, los polos no existen realmente. No son más que nombres para los lados opuestos de un spin.

El experimento de la Dra. Wu suministraba por primera vez en la historia de la ciencia un método para rotular los extremos de un eje magnético en una forma que no es en absoluto convencional. *El extremo sur es el extremo de un núcleo de cobalto 60 que es más probable que emita un electrón.*

El núcleo ya no puede ser pensado como análogo a una esfera o un cilindro que giran. Ahora debe considerarse como análogo a un cono que gira sobre su eje. Naturalmente, esto no es más que una metáfora. Nadie tiene, por el momento, la más ligera idea de por qué y cómo un extremo del eje es diferente, de algún modo intrínseco, del otro.

Pero ¡hay una diferencia! "Nosotros ya no tratamos de mantener tornillos en la oscuridad con espesos guantes –fue como Sheldon Penman, de la Universidad de Chicago, la expuso (*Scientific American,* julio 1961)–, estamos manejando los tornillos pulcramente alineados en una bandeja, con un pequeño reflector en cada uno que indica la dirección de su cabeza."

Parece obvio ahora que aquí tenemos ya por fin una solución al problema de Ozma, un método experimental de extraer de la naturaleza una inequívoca definición de derecha e izquierda. Nosotros diríamos a los científicos del planeta X: "Enfriad los átomos de cobalto 60 hasta cerca del cero absoluto. Alinead sus núcleos mediante un potente campo magnético. Contad el número de electrones emitidos por los dos extremos de los ejes. El extremo que emite más electrones es el que nosotros llamamos 'sur'. Ahora es posible rotular los extremos del eje magnético del campo empleado para alinear los núcleos, y éstos, a su vez, pueden ser utilizados para rotular los extremos de una aguja imantada. Pongan la aguja sobre un alambre, por el cual fluye la corriente alejándose de ustedes. El polo norte de esta aguja señala en la dirección que nosotros llamamos 'izquierda'."

Hemos comunicado con precisión y sin ambigüedad al planeta X lo que entendemos por la palabra "izquierda". Ni nosotros ni ellos estaremos observando en común alguna sencilla y especial estructura asimétrica, sino que estaremos observando en común una ley universal de la naturaleza. En las interacciones débiles, la naturaleza misma, por su propia e intrínseca "mano", ha proporcionado una

definición operacional de derecha e izquierda. Es fácil comprender por qué Pauli y otros físicos no esperaban que el experimento de la Dra. Wu violase la paridad. Ello habría significado que la naturaleza no es ambidextra.

En el contexto de mi cuento publicado en *Esquire* sobre derecha e izquierda, el experimento del cobalto 60 proporciona un método por el cual los confusos astronautas podrían decir si estaban vueltos del revés. Naturalmente habrían tenido que encontrar algo de cobalto en el desconocido planeta y convertirlo en su isótopo radiactivo bombardeándolo con neutrones, etc. Pero suponiendo que tuvieran los aparatos y hubieran encontrado los materiales necesarios, ¿habrían sido capaces de averiguar su "mano"?

De modo semejante, el experimento de la Dra. Wu infringe claramente la afirmación de que todos los sucesos naturales pueden ser fotografiados en una película cinematográfica y proyectados en forma trastocada sin que el espectador se dé cuenta.

Ejercicio 16: *Explique con precisión cómo una observación de todos los detalles del experimento cobalto 60, cuando se ve como una película proyectada, nos permitiría decir si la película ha sido trastocada.*

Aunque la prueba contra la conservación de la paridad fue firmemente establecida por los trabajos de la Dra. Wu a fines de 1956, el experimento no quedó definitivamente completado hasta principios de enero de 1957. Los resultados fueron anunciados formalmente por el distinguido físico Isador Rabi, de la Universidad de Columbia, el 15 de enero de 1957. El anuncio incluía también los resultados de un experimento confirmatorio realizado por los físicos de Columbia en los laboratorios del ciclotrón Nevis, en Irvington-on-Hudson, en el condado de Westchester (Nueva York). Esta prueba confirmatoria, hecha con mesones mu, mostraba una "mano" aún más acusada. Los mesones mu emiten dos veces más electrones en una dirección que en la otra. Independientemente de estos dos experimentos, una tercera prueba fue realizada en la Universidad de Chicago, utilizando la degradación de mesones pi y mu. La prueba demostró también la violación de la paridad. En todo el mundo los físicos comenzaron a comprobar la paridad en otras interacciones débiles. En 1958 era evidente que la paridad era infringida en *todas* esas interacciones. El enigma theta-tau estaba resuelto. Hay únicamente *un* mesón K. La paridad *no* se conserva.

"Una estructura teórica bastante completa ha caído por su base –declaró Rabi (citado por el *New York Times,* 16 enero 1957)– y no estamos seguros de cómo recomponer los pedazos." Un físico anónimo decía –según informó el *Times*– que los físicos nucleares habían estado golpeando durante años una puerta cerrada para tan sólo descubrir súbitamente que no había puerta en absoluto, sino la figura de una puerta pintada en una pared. Ahora –continuaba– estamos libres para mirar alrededor en busca de la verdadera puerta.
O. R. Frisch, el físico que participó en el descubrimiento de la fisión nuclear, refiere en su libro *Atomic Physics Today* (Basic, 1961) que el 16 de enero de 1957 recibió por correo aéreo la siguiente carta de un amigo:

Querido Roberto:

ÚLTIMA NOTICIA. La paridad no se conserva. Aquí, en Princeton, no se habla de otra cosa; dicen que es el resultado más importante desde el experimento de Michelson...

El experimento de Michelson fue la famosa prueba Michelson-Morley, en 1887, que estableció la constancia de la velocidad de la luz con independencia del movimiento de la fuente y del observador, un experimento histórico que abrió el camino a la teoría de la relatividad de Einstein. El experimento de la Dra. Wu puede muy bien resultar igualmente histórico.

Los dos experimentos son muy parecidos en sus elementos de sorpresa. Todo el mundo esperaba que Albert Michelson y Edward Morley detectarían un movimiento de la Tierra con relación a un "éter" fijo. Lo que tanto trastorno provocó fue el resultado negativo de su experimento.

Todo el mundo esperaba que la Dra. Wu encontrase una simetría bilateral en el proceso de la desintegración beta. ¡La naturaleza salía con otra sorpresa! Era bastante sorprendente que ciertas partículas tuvieran lateralidad; pero más sorprendente aún era que tal sesgo sólo pudiera observarse en las interacciones débiles. Los físicos sintieron una conmoción aún mayor que la sentida por Mach cuando encontró primeramente la asimetría de la brújula y el hilo conductor.

"Ahora –escribía Pauli a Weisskopf el 27 de enero, cuando le llegó la asombrosa noticia– que ha pasado la primera impresión comienzo a volver en mí. Sí; fue muy dramático. El lunes, 21, a las ocho de la tarde, tenía que dar una conferencia sobre la teoría del neutrino. A las cinco recibí tres artículos de carácter experimental (los informes sobre las tres primeras pruebas de la paridad). Me hallo sorprendido, no tanto por el hecho de que el Señor prefiera la mano izquierda como por el hecho de que todavía parece ser simétrico a izquierdas cuando se expresa enérgicamente. En suma: la cuestión auténtica parece ser ahora: ¿Por qué en las interacciones fuertes son simétricas derecha e izquierda?"

El físico pakistaní Abdus Salam (de cuyo artículo sobre "Partículas elementales", en *Endeavor,* abril 1958, hemos tomado las citas de las cartas de Pauli) trató de explicar a un amigo de formación literaria y artística el por qué del revuelo que había provocado entre los físicos la violación de la paridad. "Yo le pregunté –escribía Salam en el artículo– si algún escritor clásico había imaginado alguna vez gigantes con un solo ojo izquierdo. Él confesó que se habían descrito gigantes con un solo ojo, y me proporcionó una lista completa de ellos, pero los gigantes siempre tenían su único ojo en la mitad de la frente. En mi opinión, lo que habíamos encontrado es que el espacio es un débil gigante con el ojo a la izquierda."

El físico Jeremy Bernstein, en un artículo titulado "Una cuestión de paridad", que apareció en *The New Yorker* el 12 de mayo de 1962, reveló una faceta irónica de la historia de la violación de la paridad. En 1928, tres físicos de la Universidad de Nueva York ¡habían descubierto realmente una violación de la paridad en la degradación de un isótopo radiactivo de radio! El experimento había sido repetido con refinadas técnicas en 1930. "No solamente cada vez –relataba el experimentador–, sino incluso en todas las lecturas de cada ensayo, con pocas excepciones", el efecto era observable. Pero esto ocurría en un tiempo –como dice Bernstein– en que no había contexto teórico en el que situar estos resultados, que fueron rápidamente olvidados. "Eran –escribía Bernstein– una especie de declaración hecha en el vacío. Se tardó casi treinta años de intensas investigaciones en todas las ramas de la física experimental y teórica, y sobre todo se necesitaron los trabajos de Lee y Yang para que los físicos pudieran apreciar exactamente lo que estos primeros experimentos significaban."

En 1957 Lee y Yang recibieron el Nobel de Física por su obra. Lee tenía entonces treinta años; Yang, treinta y cuatro. La elección era inevitable. El año 1957 había sido el más apasionante en la moderna física de las partículas, y Lee y Yang habían contribuido al máximo a ello. Hoy los dos tienen despachos contiguos en el Institu-

te for Advanced Study, en Princeton, donde continúan colaborando. Ambos viven en Princeton con sus mujeres e hijos, orgullosos de su herencia china, profundamente dedicados a la ciencia y con un amplio círculo de intereses ajenos a la física y las matemáticas. Si usted quiere saber más de estos dos hombres notables, lea el excelente artículo de Bernstein en el *New Yorker*.

Vale la pena detenernos a señalar que, como tantas otras revoluciones en física, ésta aconteció en gran medida como resultado de trabajos matemáticos teóricos, enormemente abstractos. Ninguno de los tres experimentos que primero violaron la paridad habría sido realizado en la época en que lo fueron si Lee y Yang no hubieran dicho a los experimentadores lo que tenían que hacer. Lee no tenía experiencia de laboratorio. Yang había trabajado poco tiempo en un laboratorio de la Universidad de Chicago, donde fue una vez una especie de ayudante del gran físico italiano Enrico Fermi. No había sido afortunado en su trabajo experimental. Su compañero había escrito un pareado sobre él, que Bernstein repite:

Donde hay un estruendo (*bang*)
Allí está Yang.

Los estruendos de laboratorio pueden variar desde la explosión de un tubo de ensayo a la explosión de la bomba de hidrógeno. Pero los verdaderos grandes estruendos fueron los que acaecieron dentro de las cabezas de los físicos teóricos cuando intentaron ensamblar las piezas que les entregaron los físicos experimentales.

John Campbell, director de *Analog Science Fiction*, conjeturó una vez en un editorial que acaso hubiera alguna diferencia en la herencia espiritual de los mundos occidental y oriental que predispusiera a los dos físicos chinos a poner en cuestión la simetría de la ley natural. Es una idea interesante. Yo mismo señalé en mi columna de "Juegos matemáticos" en *Scientific American*, en marzo de 1958, que el gran símbolo religioso de Oriente (que figura en la bandera nacional coreana) es el círculo dividido asimétricamente, como se ve en la figura 63. Las superficies oscura y clara son conocidas por Yin y Yang, respectivamente. Yin y Yang son el símbolo de todas las dualidades fundamentales de la vida: bien y mal, belleza y fealdad, verdad y falsedad, macho y hembra, noche y día, sol y luna, cielo y tierra, placer y dolor, par e impar, derecha e izquierda, positivo y negativo... La lista es infinita. El dualismo fue simbolizado primero en China por los números dígitos pares e impares que alternaban alrededor del perímetro del *Lo shu*, el antiguo cuadrado mágico chino de tercer orden. A veces, en el siglo X el *Lo shu* era sustituido por el círculo dividido que llegó a ser el símbolo Yin-Yang dominante. Cuando se dibujaba o imprimía se empleaban el blanco y el negro, pero cuando se le pintaba, el Yang era rojo en lugar de blanco. Los dos circulillos eran añadidos habitualmente (y todavía lo son) para simbolizar el hecho de que en cada lado de cualquier dualidad hay siempre un poco del otro lado. Todo acto bueno contiene un elemento de mal; todo acto malo, un elemento de bien; toda fealdad incluye una belleza; toda belleza incluye alguna fealdad; etc.[2] Los circulillos recuerdan a los científicos que toda teoría "verdadera" contiene un elemento de falsedad: "Nada es perfecto –dice el Filósofo en *The Crock of Gold*, de James Stephen–, siempre hay algún defecto."

Ejercicio 17: *Hay un análogo tridimensional del Yin-Yang tan corriente que casi todo el mundo ha tenido alguna vez un ejemplar de él en las manos. ¿Qué es? ¿Tiene simetría bilateral?*

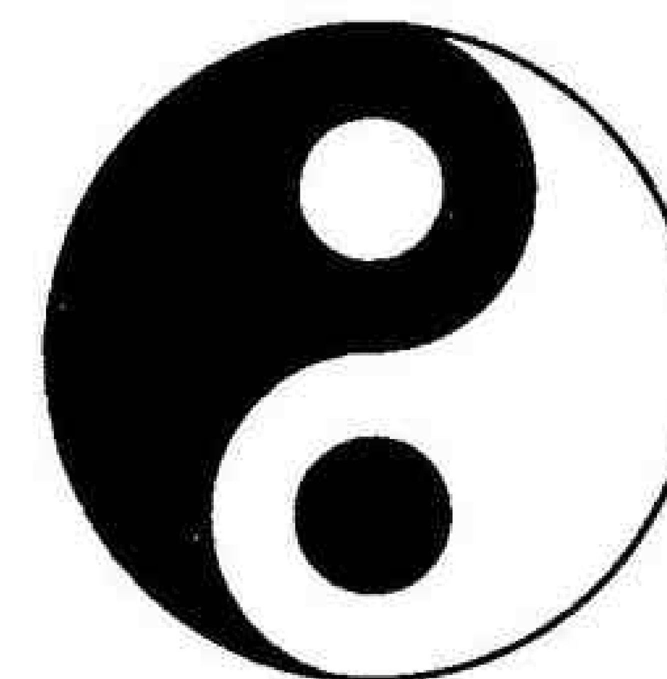


Fig. 63. El símbolo asimétrico Yin-Yang de Oriente.

La historia de la ciencia puede ser descrita como un continuo, acaso infinito, descubrimiento de nuevas protuberancias. Se pensó en otro tiempo que los planetas se movían en círculos. Incluso Galileo, aunque colocó al Sol y no a la Tierra en el centro del sistema solar, no podía aceptar la idea de Kepler de que las órbitas planetarias fueran elipses. Con el tiempo se vio claramente que Kepler tenía razón: las órbitas eran *casi* círculos, pero no completamente. La teoría de la gravitación de Newton explicó por qué las órbitas eran elipses perfectas. Después se descubrieron ligeras desviaciones en

las órbitas newtonianas y fueron, a su vez, explicadas por los factores de corrección de la teoría de la relatividad que Einstein introdujo en las ecuaciones newtonianas. "La verdadera dificultad de nuestro mundo –comenta Gilbert Chesterton en *Orthodoxy*– no es que sea un mundo irracional, ni tampoco que sea racional. El género más común de perturbación es que es casi racional, pero no por completo... Parece un poco más matemático y regular de lo que es; su exactitud es obvia, pero su inexactitud está oculta; su desvarío está a la espera."

Para ilustrarlo, Chesterton imagina a un ser extraterrestre que examina por primera vez un cuerpo humano. Advierte que el lado derecho duplica exactamente el izquierdo: dos brazos, dos piernas, dos orejas, dos ojos, dos agujeros de la nariz, incluso dos lóbulos en el cerebro. Investigando a mayor profundidad, encuentra un corazón en el lado izquierdo y deduce que hay otro corazón en el derecho. Aquí, desde luego, encuentra un poco de Yin dentro de Yang. "Es la callada desviación de la exactitud por una pulgada –continúa Chesterton–, es el *elemento* misterioso de todas las cosas. Parece una especie de secreta traición en el Universo. Donde quiera en las cosas está este elemento, callado e incalculable."

Feynman, con no menor respeto que Chesterton, dice lo mismo de esta manera al final de una conferencia sobre la simetría en las leyes naturales (Conferencia 52 en *The Feynman Lectures on Physics,* Addison Wesley, 1963):

"¿Por qué es la naturaleza tan casi simétrica? Nadie tiene idea del porqué. Lo único que podemos sugerir es algo como esto: Hay una puerta en Japón, en Neiko, que a veces es considerada por los japoneses como la puerta más bella de todo el país; fue construida en una época en que existía allí una gran influencia del arte chino. Esta puerta es muy primorosa, con gran cantidad de gabletes y bellas esculturas, muchas columnas y cabezas de dragones y príncipes esculpidas en los pilares, etc. Pero cuando se mira de cerca se ve que en el primoroso y complicado dibujo, a lo largo de uno de los pilares, uno de los pequeños elementos está esculpido cabeza abajo; por lo demás la cosa es completamente simétrica. Si se pregunta por qué, la historia es que fue esculpido al revés para que los dioses no tuvieran celos de la perfección del hombre. Así ellos deliberadamente introdujeron el error allí, de modo que los dioses no sentirían celos y no se encolerizarían contra los seres humanos.

"De manera análoga, podemos invertir la idea y pensar que la verdadera explicación de la casi simetría de la naturaleza es ésta:

que Dios hizo las leyes sólo casi simétricas ¡para que nosotros no fuéramos envidiosos de Su perfección!"

Notemos que el símbolo Yin-Yang es asimétrico. No es superponible a su imagen especular. El Yin y el Yang son figuras congruentes, cada una asimétrica, cada una con la misma mano. Por el contrario, el símbolo cristiano, la cruz, tiene simetría bilateral. Así lo es la estrella judía de David de seis puntas, a menos que se muestre como dos triángulos entrelazados que se cruzan alternativamente por encima y por debajo uno de otro. Resulta grato pensar que acaso la asimetría familiar del símbolo oriental, parte tan importante de la cultura china, puede haber desempeñado un sutil e inconsciente papel en hacer un poco más fácil para Lee y Yang ir a contrapelo de la ortodoxia científica y proponer una prueba que sus colegas occidentales, más inclinados a la simetría, apenas si habían pensado que valiera la pena.

23. Neutrinos

El famoso experimento Michelson-Morley fue realizado en 1887. Hasta 1905, unos dieciocho años más tarde, no se conocieron todas sus consecuencias, gracias al primer trabajo de Einstein sobre la teoría especial de la relatividad. Nadie sabe cuántos años pasarán antes de que otro Einstein revele todas las implicaciones del experimento de la Dra. Wu.

Por el momento, los físicos matemáticos más importantes del mundo están haciendo todo lo posible para desarrollar una teoría general que dé razón de la violación de la paridad. Apenas pasa un mes sin que las revistas de física reciban trabajos conteniendo tales explicaciones. Pero, desgraciadamente, la mayoría de ellos están escritos por físicos e ingenieros que se lanzan a la teoría sin molestarse en conocer todos los hechos, y especialmente sin preocuparse de aprender las difíciles matemáticas de la teoría de los cuantos. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que algún aficionado, falto de conocimientos técnicos que podrían hacerle precavido en exceso, pueda atinar con una nueva intuición o idea ingeniosa que abra una auténtica puerta.

Una desconcertante idea se le ocurrió inmediatamente a quienes trabajaban en la materia: ¿Puede el espacio mismo poseer en todos los puntos una especie de lateralidad intrínseca? Tanto la física clásica de Newton como las ecuaciones de la moderna teoría de la relatividad y de la teoría cuántica suponen que el espacio es completamente isotrópico. Esto significa que una dirección en el espacio no es diferente de otra; el espacio es esféricamente simétrico. ¿Es posible construir modelos del Cosmos en los cuales el espacio tenga lateralidad intrínseca?

Sí; los matemáticos pueden construir modelos de un espacio

aniotrópico (no isotrópico) de tres dimensiones que tengan una asimetría de la misma lateralidad en todos los puntos. No es fácil, y tales espacios están muy lejos de ser sencillos. Se puede pensar que una torsión general del espacio, comparable a la torsión de la cinta de Moebius, serviría de truco, pero no sirve. La torsión ha de estar presente en todos los puntos, y ser de tal carácter que sus efectos sobre las interacciones débiles sean los mismos, con indiferencia de la orientación del aparato. Como la Tierra gira en el espacio, el aparato empleado en las pruebas de paridad cambia constantemente su orientación; sin embargo, los resultados de la prueba siguen siendo los mismos. Habría que construir un espacio en el cual una especie de "veta" fina inobservable proporcionase una torsión asimétrica, con indiferencia de las orientaciones de las partículas afectadas por la torsión.

Suponiendo que exista esa "veta", no es difícil ver cómo la paridad puede ser infringida únicamente en las interacciones débiles. En los efectos fuertes, la sutil y pequeña torsión del espacio sería despreciable. Si se juega a los bolos en una pista alabeada, el efecto de alabeo puede ser superado haciendo rodar la bola rápidamente. En efecto, usted puede dar a la bola un giro que la hará curvarse *en contra* del alabeo. Pero si usted lanza una bola que se mueve lentamente, o emplea una bola tan pequeña como un guisante es más probable que el alabeo de la pista desvíe su trayectoria. De modo semejante, las interacciones fuertes de las partículas que se mueven rápidamente pueden eliminar el efecto de sesgo asimétrico en el espacio-tiempo. Los grandes movimientos macroscópicos de las bolas de billar y de los planetas, y la radiación, que se mueve a la velocidad de la luz, pueden, de modo semejante, superar el efecto de tal sesgo. Únicamente sería observable en las interacciones débiles y lentas de las partículas elementales.

Esta manera de abordar el problema ha agradado a muchos físicos. Está a favor de ella, por ejemplo, Otto Frisch, de Cambridge, en su libro (antes citado) *Atomic Physics Today*. "¿Podemos suponer –pregunta– que el cobalto no sería radiactivo si el espacio no tuviera torsión? A pesar de lo atrayente (en algunos aspectos) de esta teoría, la mayor parte de los físicos de partículas creo que responderían que no.

Para empezar, la gravedad es mucho más débil que las fuerzas que intervienen en las interacciones débiles, y sabemos que participa íntimamente de la estructura espaciotemporal del Cosmos. Era de esperar que la asimetría se mostrase en los efectos gravitatorios,

pero tal asimetría nunca ha sido observada. En efecto, la gravedad es tan débil que es completamente despreciable al nivel de las partículas; pero si la teoría general de la relatividad es cierta, la gravedad no es más que otro modo de hablar de la inercia. Las partículas poseen una masa inercial. En todos los experimentos hechos hasta ahora con partículas elementales, no se ha observado nada que sugiera el más ligero indicio de asimetría inercial, un hecho sumamente difícil de conciliar con una torsión local en todos los puntos del espacio-tiempo. De hecho, fuera de las interacciones débiles, todas las leyes de la naturaleza muestran una total indiferencia por la derecha o la izquierda. Por estas razones, se comprende que los físicos se muestren reacios a renunciar a la idea clásica de que el espacio es isotrópico.

Afortunadamente hay una segunda manera de abordar las interacciones débiles, por la cual la lateralidad puede ser explicada sin recurrir a la torsión de la "veta" del espacio-tiempo. Este procedimiento descansa sobre el supuesto de que de alguna manera (no sabemos exactamente cómo) algunas de las partículas elementales exhiben en su estructura una verdadera asimetría espacial. Hemos visto que a los químicos les resultó difícil creer que las moléculas pueden poseer una estructura asimétrica en la manera en que están enlazados sus átomos, pero el descubrimiento de los estereoisómeros aclaró por fin el misterio. Muchos físicos piensan que nuestro conocimiento actual de las partículas elementales es similar al conocimiento de las moléculas antes del descubrimiento del estereoisomerismo. No ha sido necesario, nos recuerda Teller, investigar "todavía" la estructura interna del electrón. ¿Es posible que en el futuro, ayudados de instrumentos ahora inimaginables, los físicos encuentren que las partículas elementales están lejos de ser elementales?

De momento, no hay más que vagas, inquietantes insinuaciones en esta dirección. La más fuerte procede del reciente descubrimiento de que el neutrino es, efectivamente, una estructura ¡con una verdadera lateralidad espacial!

La historia del neutrino es digna de ser descrita. Como hemos dicho anteriormente, el neutrón (presente en los núcleos de todos los átomos, excepto el hidrógeno) es una partícula que tiene un momento magnético, pero carga cero. Tiene una masa ligeramente mayor que la masa del protón. En la degradación beta de los núcleos radiactivos, un neutrón se escinde en un protón y un electrón. Sin embargo, las masas del protón y del electrón sumadas no son absolutamente iguales a la masa del neutrón original. Algo de la

masa perdida se ha convertido en energía con arreglo a la fórmula de Einstein $E=mc^2$. Aun cuando esto se tenga en cuenta, sin embargo, queda todavía una ligera cantidad de masa-energía sin contar. ¿Dónde se va? En 1931 Pauli sugirió que es retirada por un "ladrón" invisible, desapercibido, una partícula escurridiza cuya existencia ha de ser supuesta para igualar los dos términos de la ecuación. Cuando Fermi desarrolló su teoría de las interacciones débiles para explicar la lentitud de la degradación beta, aprovechó la sugerencia de Pauli. El "neutrino" o "pequeño neutral" fue la feliz elección de Fermi para nombrar la partícula ladrona de Pauli. Las propiedades del neutrino eran tales que parecía imposible atraparlo. Pero su realidad fue definitivamente establecida en 1956 por Frederick Reines y Clyde L. Cowan hijo, empleando como fuente de neutrinos una enorme pila nuclear de la Comisión de Energía Atómica de Savannah River, en Georgia. Más tarde se comprobaría que en realidad atraparon antineutrinos, que se producen con gran abundancia en los reactores nucleares de fusión; pero esto es anticiparnos a nuestra historia.

Hace años, en una divertida historieta había una canción cuyo estribillo decía: "Tú no eres nada, pero nada, tú no eres nada en absoluto." El neutrino se aproxima a esta descripción tanto como pueda hacerlo una partícula elemental y ser todavía algo. Se cree que su masa en reposo es cero. En este caso, debe viajar a través del espacio a la velocidad de la luz. No tiene carga ni campo magnético. Tiene spin. En realidad, esto es todo lo que tiene. Es, como algunos físicos han dicho, casi puro spin, como la simple sonrisa del Gato de Cheshire.

A causa de que ni es atraído ni repelido por los campos eléctricos y magnéticos de otras partículas, un neutrino, que venga del espacio, es probable que pase limpiamente a través de la Tierra, como si no hubiera nada en absoluto en su camino. La probabilidad de que fuera detenido por una partícula de la Tierra se calculó aproximadamente en uno contra diez mil millones. Afortunadamente hay bastantes neutrinos alrededor, de modo que se producen colisiones; de otro modo el "pequeño neutral" nunca habría sido detectado. Cuando usted lee estas palabras, miles de millones de neutrinos, procedentes del Sol y otras estrellas, tal vez incluso de otras galaxias, están pasando a través de su cráneo y cerebro.

Los neutrinos, son muy pequeños. – No tienen carga y no tienen masa – y no interactúan en absoluto. – La Tierra no es más que

una tonta esfera – para ellos, a través de la cual simplemente pasan – como criados que quitan el polvo a una habitación – o fotones que atraviesan una lámina de cristal. – Desprecian el gas más exquisito – e ignoran el muro más sólido, – el frío acero y el sonoro bronce. – Insultan al potro en su cuadra – y burlándose de las barreras sociales – nos infiltran a usted y a mí. Como altas – e indoloras guillotinas, nos caen – a través de las cabezas hasta la hierba. – Entran por la noche en el Nepal – y traspasan al amante y su amiga desde debajo del lecho. – A usted le parece maravilloso; pero yo lo llamo incordiar[1].

La inocuidad del neutrino movió a Ralph S. Cooper, un joven físico del Laboratorio Científico de Los Alamos, a inventar en 1961 una maravillosa arma nueva, que llamó la bomba de neutrinos. Se recordará que en 1961 se hablaba mucho de desarrollar una bomba de neutrones "limpia", que no produciría efectos caloríficos ni devastadores, ni provocaría lluvia radiactiva. Los edificios quedarían intactos. La bomba, con una gran explosión de radiación de neutrones, no haría más que destruir toda forma de vida dentro de su radio de alcance. La posibilidad de que los EE.UU. construyeran una bomba de neutrones fue reavivada en 1977, y en la actualidad prosigue el debate acerca de si ello sería una acción prudente o una estupidez. La propuesta de Cooper era construir una bomba aún más limpia, que produciría una gran explosión de radiación de neutrinos. El poder de penetración de los neutrinos es mucho mayor que el de los neutrones. Cooper indicaba que haría que los neutrones parecieran caramelos de malvavisco. "Una bomba de neutrinos –dijo– sería lo último en armas nucleares limpias, no devastadoras."

La idea fue publicada por primera vez en *Los Alamos Scientific Laboratory News* el 13 de julio de 1961, y luego en la obra de Groff Conklin *Great Science Fiction by Scientists* (Collier Books, 1962). Es una idea demasiado buena para pasar por ella sin dar algunos detalles más. La carga de la bomba consistiría en hidrógeno, pero hidrógeno con sus protones y electrones convertidos por un ingenioso procedimiento en dos nuevas partículas, el seudoprotón y el seudoelectrón. "El seudoelectrón no tendría spin", informaba el *New York Times* el 13 de agosto de 1961, ni tampoco extrañeza (una propiedad de las partículas elementales). Se le denominaría "ficción". El seudoprotón tampoco tendría spin, pero poseería una extrañeza de uno. Se le llamaría partícula "verdad", por ser la verdad más extraña que la ficción. Las dos seudopartículas se aniquilarían mutuamente en una complicada interacción, en la cual se formaría un nuevo elemento llamado "veritonio". Cada átomo de "veritonio" se degradaría radiactivamente en 2.000 neutrinos en un tiempo que Cooper llamaba "el momento de la verdad".

"Una vez que la bomba de neutrinos fuera detonada –explicaba Cooper–, no quedaría una partícula de verdad en ella." La detonación (producida por el aire al precipitarse en el vacío temporal dejado por la desaparición del hidrógeno) produciría "un fuerte estruendo informando a las víctimas en el área del blanco de que han sido atrapadas."

Si se supone que el neutrino tiene spin y se mueve en una dirección paralela al eje del spin, es obvio que puede girar en cualquier dirección. Imagínese un punto en el exterior de esa partícula. (Naturalmente, ésta es la manera más tosca posible de hablar sobre algo que únicamente puede ser descrito con precisión por medio de fórmulas matemáticas, pero la tosca analogía no carece totalmente de significado.) Conforme la partícula se mueve hacia adelante a la velocidad de la luz, el punto engendrará una espiral hacia la derecha o hacia la izquierda. Cuando hablamos de derecha o izquierda se supone que el observador está quieto o moviéndose a menor velocidad que la partícula, con relación a algún punto exterior de referencia. Si el observador se mueve más rápidamente que la partícula y en la misma dirección, entonces la partícula tiene un movimiento relativo que la va alejando del observador. Esto cambiaría la orientación de la espiral de la partícula.

Para comprenderlo, imagínese que un neutrino con movimiento helicoidal dextrorso está aproximándose a usted. Usted lo verá desde su extremo frontal, por decirlo así, como una hélice dextrorsa. Le rebasa, y se aleja. Usted lo ve entonces desde su extremo posterior, pero todavía es una hélice dextrorsa. Suponga ahora que usted y el neutrino dextrorso se mueven en la misma dirección, pero usted va dos veces más rápido que el neutrino. En el espacio-tiempo no hay movimiento absoluto, sino solamente relativo. Desde su punto de referencia, que es tan bueno y seguro como cualquier otro (en la teoría de la relatividad no hay sistemas de referencia privilegiados), el neutrino estará alejándose de usted. Usted lo verá como una espiral a *izquierdas*. Lo mismo sucedería si usted estuviera detrás del neutrino y aproximándose a él. Con respecto a un punto exterior de referencia, como por ejemplo las estrellas fijas, usted estaría acercándose a un neutrino dextrorso, pero con respecto a su punto de referencia el neutrino sería una espiral a *izquierdas* moviéndose hacia usted.

¿Puede, entonces, un neutrino ser de la mano derecha o de la izquierda dependiendo de su movimiento con relación al observador? No, porque el neutrino, como el fotón de la radiación de la luz, se mueve a la velocidad de la luz. La teoría de la relatividad no permite a un observador moverse más rápidamente. Por esta razón, siempre que observa un neutrino particular que se mueve acercándose o alejándose de él, lo ve con la misma "mano". No puede situarse en un punto de referencia desde el cual vea el neutrino de modo diferente. En suma: la lateralidad de un neutrino es invariable para todos los observadores posibles.

La sugerencia de que una partícula con spin puede ser estable en cualquiera de las dos formas helicoidales, una de ellas imagen especular de la otra, fue anticipada ya en 1929 por Hermann Weyl, el gran matemático alemán. Carecía en absoluto de datos experimentales sobre qué fundar su especulación; le pareció justamente que lo pedían la sencillez y la belleza matemática. Nadie prestó mucha atención a la teoría de Weyl. ¿Por qué? ¡Porque violaba la ley de conservación de la paridad! Introducía en la naturaleza una inexplicable asimetría. Cuando se descubrió la violación de la paridad, la teoría de Weyl se convirtió en una conjetura profética. En efecto, se acumuló rápidamente la prueba de que el neutrino tenía una antipartícula, el antineutrino, y que los dos podían diferenciarse precisamente de la manera que Weyl había sugerido.

La teoría de los "dos componentes" del neutrino, como se la llama, fue propuesta independientemente, en 1957, por una serie de físicos teóricos: Lee y Yang, Abdus Salam, de Pakistán, y Ley Davidovich Landau, de la Unión Soviética. (Weyl murió en 1955, dos años antes de que su teoría fuese resucitada.) Hay sólidas pruebas de que la teoría es esencialmente correcta. En la desintegración beta, cuando los electrones son despedidos de los núcleos, van acompañados de antineutrinos que tienen un spin en el sentido de las agujas del reloj cuando se les ve desde el núcleo, es decir, que su trayectoria tiene la torsión de una hélice dextrorsa. Por otra parte, cuando un antineutrón se escinde en el proceso de la degradación antibeta, son emitidos positrones acompañados por neutrinos de la mano izquierda (véase figura 64). Aquí por primera vez en la historia de la física de partículas, se ha visto que una partícula tiene una estructura asimétrica estable (en este caso la estructura es sencillamente una unión del spin y la dirección del movimiento), que exhibe una verdadera asimetría espacial. El neutrino y antineutrino son los dos primeros análogos conocidos, al nivel de las

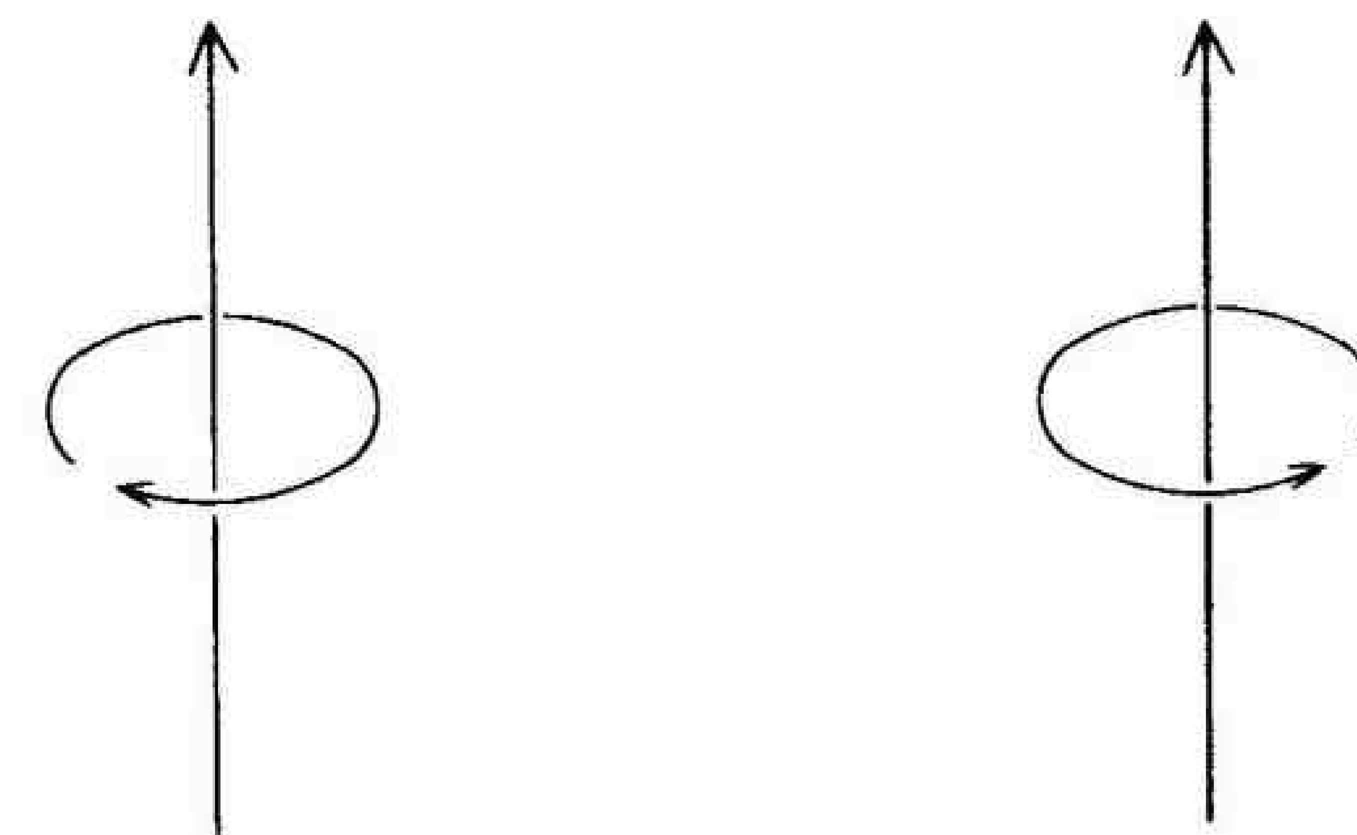


Fig. 64. Diagramas del neutrino (izquierda) y del antineutrino (derecha).

partículas, de las moléculas dextrógiras y levógiras del ácido tartárico de Pasteur.

En 1957, varios físicos, entre los que se contaban Lee y Yang, complicaron el panorama. Sugirieron que pudiera haber dos clases distintas de pares neutrino-antineutrino, asociada la una con las desintegraciones donde se produzca emisión de electrones, y la otra, con las desintegraciones que emitan muones. Tal hipótesis fue confirmada en 1962 por un grupo de físicos de la Universidad de Columbia y del Laboratorio Nacional de Brookhaven, que trabajaron con el sincrotrón de gradiente alternativo en Brookhaven, Yaphank, Long Island, Nueva York.

El muón, descubierto en 1936, es uno de los misterios más exasperantes de la física de partículas. Es idéntico al electrón en todas sus interacciones, pero su masa es unas 200 veces mayor que la del electrón. Es como si el electrón, bajo ciertas condiciones, pudiera hacerse 200 veces más pesado de lo habitual.

¿Es el muón un grueso electrón, o es una partícula diferente? Los físicos están perplejos, porque no se les ocurre ni una sola razón que haga necesaria la existencia de los muones. Su actitud recuerda a la Avispa del recién hallado episodio "perdido" de *A través del espejo*, de Lewis Carroll. A la Avispa le parecía que los ojos de Alicia estaban tan juntos, que no acertaba a explicarse por qué tenía dos, si con uno se arreglaría perfectamente.

El misterio en nada se aminora por el hecho de que el muón tenga su propio neutrino, indistinguible del neutrino del electrón, excepto en que cuando es producido por una interacción en la que tomen parte los muones, "se acuerda" de que pertenece a un muón, y así, al reaccionar con un protón o un neutrón produce otro muón.

De modo análogo, el neutrino del electrón recuerda también de quién es.

El *New York Times* del 1 de julio de 1962 citaba a un físico anónimo, que había exclamado lleno de sorpresa: "Es como si hubiéramos descubierto dos clases de vacío."

A finales de los años 70 fue descubierto el tauón, un electrón aún más pesado. Como el muón, se comporta exactamente igual que un electrón, salvo que tiene una masa unas 3.500 veces mayor. Posee también su neutrino, el neutrino-tauón, y el anti-tauón posee su anti-neutrino-tauón. Los tres neutrinos son levógiros (giran en sentido contrario al de las manecillas del reloj al alejarse del observador).

De las partículas producidas en las reacciones termonucleares que tienen lugar en el seno de las estrellas, los neutrinos son las únicas que pueden escapar fácilmente. Billones de billones de estos neutrinos de origen extraterrestre están constantemente fluyendo a través de la Tierra, todos, a excepción de una minúscula porción, procedentes de nuestro Sol. Se estima que un 3 % de la energía radiada por el Sol está formada por neutrinos del electrón.

Desde hace más de quince años, Raymond Davis Jr. ha estado atrapando neutrinos solares con un depósito detector lleno de líquido limpiador, situado aproximadamente a una milla de profundidad dentro de una mina de oro en Lead, Dakota del Sur. Los resultados han sido desconcertantes. Se han publicado centenares de artículos en los que se trata de explicar el hecho sorprendente de que Davis está obteniendo sólo una cuarta parte aproximadamente de los neutrinos que se esperaban. ¿Dónde están los neutrinos que faltan?

La teoría más pintoresca la propuso Bruno Pontecorvo, un físico de origen italiano que emigró a la Unión Soviética en 1950. Puede ser, sugirió, que al viajar por el espacio un neutrino vaya oscilando entre los tres tipos de neutrinos. Esto nunca ha sido observado, pero de ser cierto sería una explicación elegante de los neutrinos que faltan. Unos dos tercios de los neutrinos solares llegarían a la Tierra en forma de neutrinos muón y tauón, que no serían detectados por el equipo de Davis.

Tales oscilaciones no podrían producirse si los neutrinos no tuvieran una masa diminuta. En efecto, si no carecen de masa, las consecuencias para la cosmología serán inmensas. Su masa podría ser suficiente para parar eventualmente el proceso de expansión del Universo y darle marcha atrás, y seguramente desempeñaría un papel importante en la formación de las galaxias.

Reines, que colaboró en la búsqueda del primer neutrino, cree haber detectado la oscilación de neutrinos, pero otros físicos no están de acuerdo. John Wheeler estima que las probabilidades de que el neutrino tenga masa son de cinco a uno en contra, pero Sheldon Glashow tiene otra opinión: "Claro que el neutrino tendrá masa", –se le cita en el artículo de Bruce Schechter "A Prodigal Particle" (*Una partícula pródiga, Discovery,* marzo de 1982)–: "no existe ninguna razón para que no sea así." Cualquier día encontraremos la respuesta.

24. El Sr. Partido

Cuando un electrón se encuentra con un positrón, la masa de las dos partículas desaparece en una explosión de radiación. Hemos visto antes (en el capítulo 21) cómo Dirac lo explicó, lo mismo que la creación simultánea de un par, en términos de la teoría de los "hoyos". Una partícula tomada de un continuo denso deja un hueco, que es su antipartícula. Cuando una partícula cae de nuevo en el hoyo, éste y la partícula desaparecen. Más recientemente, en un fascinante artículo sobre "Visión de la naturaleza por los físicos", en *Scientific American* (mayo de 1963), Dirac sugirió una descripción diferente. Dirac comparaba electrón y positrón con los dos *extremos* de una línea de fuerza electromagnética. La línea tiene una dirección que sirve para distinguir los dos extremos. La unión del electrón y el positrón sería comparable a unir el extremo positivo de una línea con el extremo negativo de otra. Los extremos (electrón y positrón) desaparecen, dejando únicamente una línea de fuerza. De modo semejante, al cortar una línea de fuerza resultaría la creación de un par de extremos positivo y negativo.

Tales descripciones no se pueden tomar, desde luego, literalmente; no son más que sugerencias de teorías que han de ser elaboradas matemáticamente y probadas experimentalmente. Son intentos de dar cuenta de lo que, por el momento es el mayor de todos los misterios de la teoría cuántica: la naturaleza de la carga eléctrica. Nadie sabe lo que distingue a una carga positiva de una negativa, por qué la carga es siempre un múltiplo exacto de un cuanto, o por qué un cuanto de carga negativa tiene exactamente la misma fuerza que un cuanto de carga positiva. Estos misterios están evidentemente enlazados con la simultánea creación de un par y aniquilación de un par de una partícula y su antipartícula.

¿Hay alguna imagen que explique las cargas positiva y negativa en términos de lateralidad? Sí; es fácil pensar en muchas descripciones toscas en esa línea. Hace unos años leí en un periódico que un funcionario londinense había propuesto una vez más la construcción de un puente sobre el Canal para enlazar Inglaterra y Francia. Como los autos ingleses circulan por el lado izquierdo de la carretera y los autos franceses por la derecha, instantáneamente tuve una visión comparable al choque de una partícula y una antipartícula. Seguramente el tráfico en el puente terminaría en atasco total. Una descripción mejor la suministraría la fusión de dos anillos de humo cuyos movimientos de vórtice fueran opuestos. Naturalmente, los momentos de giro se anularían uno a otro y las dos estructuras se disolverían.

En la geometría plana, el triángulo equilátero nos proporciona una sencilla imagen de la creación y aniquilación de un par. Este triángulo es, desde luego, simétrico-idéntico a su imagen especular. Si lo dividimos en dos partes iguales verticalmente desde la base (figura 65), se observa la creación de un par de triángulos rectángulos asimétricos de "mano" opuesta. Ninguno de los dos triángulos es superponible al otro sin sacarlo del espacio bidimensional y darle la vuelta. Si se reúnen los dos triángulos de mano distinta para rehacer el triángulo equilátero, se produce la aniquilación simultánea de un par.

Imaginemos el plano de dos dimensiones cubierto de pequeños triángulos, de los cuales unos son equiláteros, otros, lados izquierdos de triángulos equiláteros, y otros, lados derechos. Curiosamente es una imagen semejante a las cargas positivas y negativas en el Universo. La ley de "conservación de la carga", que nunca hasta ahora ha sido violada, afirma que la cantidad neta de carga en el

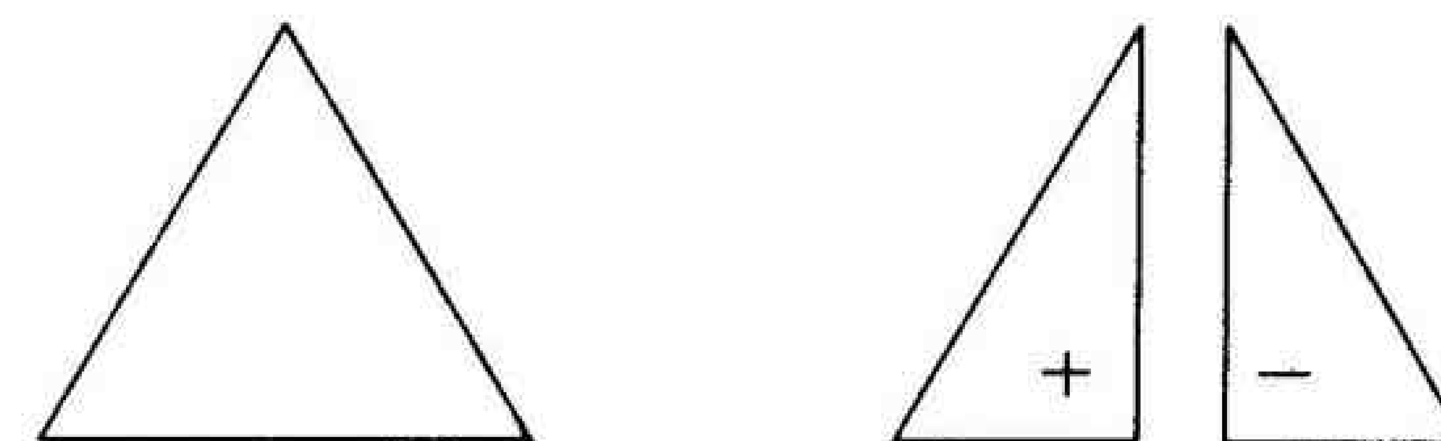


Fig. 65. Un sencillo modelo de conservación de la carga.

Cosmos nunca se altera. Esto es verdad también respecto a los pequeños triángulos. Supongamos que empezamos con 1.000 triángulos equiláteros neutros, 500 lados "negativos" (de la derecha) de esa clase de triángulos, y 200 lados "positivos" (de la izquierda). Hay 300 lados más de la derecha que de la izquierda. Ésta es la carga neta del sistema. Podemos dividir por la mitad tantos triángulos equiláteros como queramos y volver a unir cualquier número de mitades, pero dado que creamos y destruimos a pares, siempre habrá exactamente 300 triángulos más de la mano derecha que de la izquierda. La carga neta del sistema se conserva.

Una fantástica imagen tridimensional de la misma situación la proporciona L. Frank Baum en una de sus poco conocidas fantasías no-Oz, *Dot and Tot of Merryland* (George M. Hill, 1901). El sexto valle de Merryland está habitado por animales, autos y otros juguetes de cuerda. A los juguetes les da cuerda un supervisor llamado Sr. Partido (Mr. Split). Se le llama así porque tiene un trabajo tan pesado que, cuando se hace penoso, se divide exactamente en dos por la mitad. Cada mitad anda separadamente, con su única pierna dando cuerda a los juguetes. El Sr. Partido Izquierdo, que es de color rojo vivo, pronuncia únicamente la mitad izquierda de las palabras. El Sr. Partido Derecho, que es blanco, pronuncia sólo la mitad derecha de las palabras. Cuando los dos se engarzan, el Sr. Partido habla normalmente: "No creo que haya en todo el mundo –dice la reina de Merryland– alguien que trabaje tanto como el Sr. Partido."

Aquí, de nuevo, si consideramos las cargas positivas y negativas como las dos mitades de infinitos Sres. Partidos, unas veces trabajando separadamente y otras reunidas, tenemos otra analogía con la ley de conservación de las cargas[1].

Los prestidigitadores conocen muchos trucos con cuerdas, cordones y pañuelos (retorcidos a manera de cuerdas) que proporcionan divertidos ejemplos de mutua aniquilación por un encuentro de la derecha y la izquierda. En muchos casos, las dos estructuras que intervienen son hélices de mano contraria. Charles Howard Hinton, un matemático americano algo excéntrico, casado con una de las hijas del matemático irlandés George Boole, describió uno de esos trucos para esclarecer su teoría de las cargas positiva y negativa. En el primer capítulo de su libro *A Picture of Our Universe* (reimpreso en la primera serie de *Scientific Romances*, Allen & Unwin, 1888) comparó las cargas positiva y negativa a los dos gatos irlandeses de la fábula inmortalizados en la anónima copla:

Una vez eran dos gatos de Kilkenny
que pensaban que sobraba uno,
sí maullaban y mordían
y arañaban y peleaban
hasta que, excepto sus uñas y las puntas de sus rabos,
en lugar de dos gatos no hubo ninguno.

"Es perfectamente posible –escribió Hinton– hacer un modelo de los gatos de Kilkenny. Y propongo simbolizar... el gato de Kilkenny por una hélice."

El modelo de Hinton era un trozo de cuerda enrollado alrededor de un palo en la forma que se ve en la figura 66. Primero se enrolla la cuerda varias veces en torno al palo. Después se sostiene la cuerda en su sitio con el pulgar, de modo que se pueda continuar enrollando, pero en dirección opuesta. Paramos cuando hayamos dado el mismo número de vueltas que dimos de la otra manera. Si se imagina un plano de simetría que divida por la mitad el palo, es evidente que la espiral de un lado es la imagen especular de la espiral del otro lado. Deje de apretar con el pulgar en el centro de la cuerda y tire de los dos extremos que penden a uno y otro lado. La cuerda se estirará, libre del palo. Cada espiral es un gato de Kilkenny. El tirón de la cuerda es su batalla. A causa de que las dos torsiones son imágenes especulares, se aniquilan una a la otra.

"Ésta es la concepción mecánica que deseo que usted adopte –decía Hinton–. Hay cosas tales como las hélices. Supongamos que

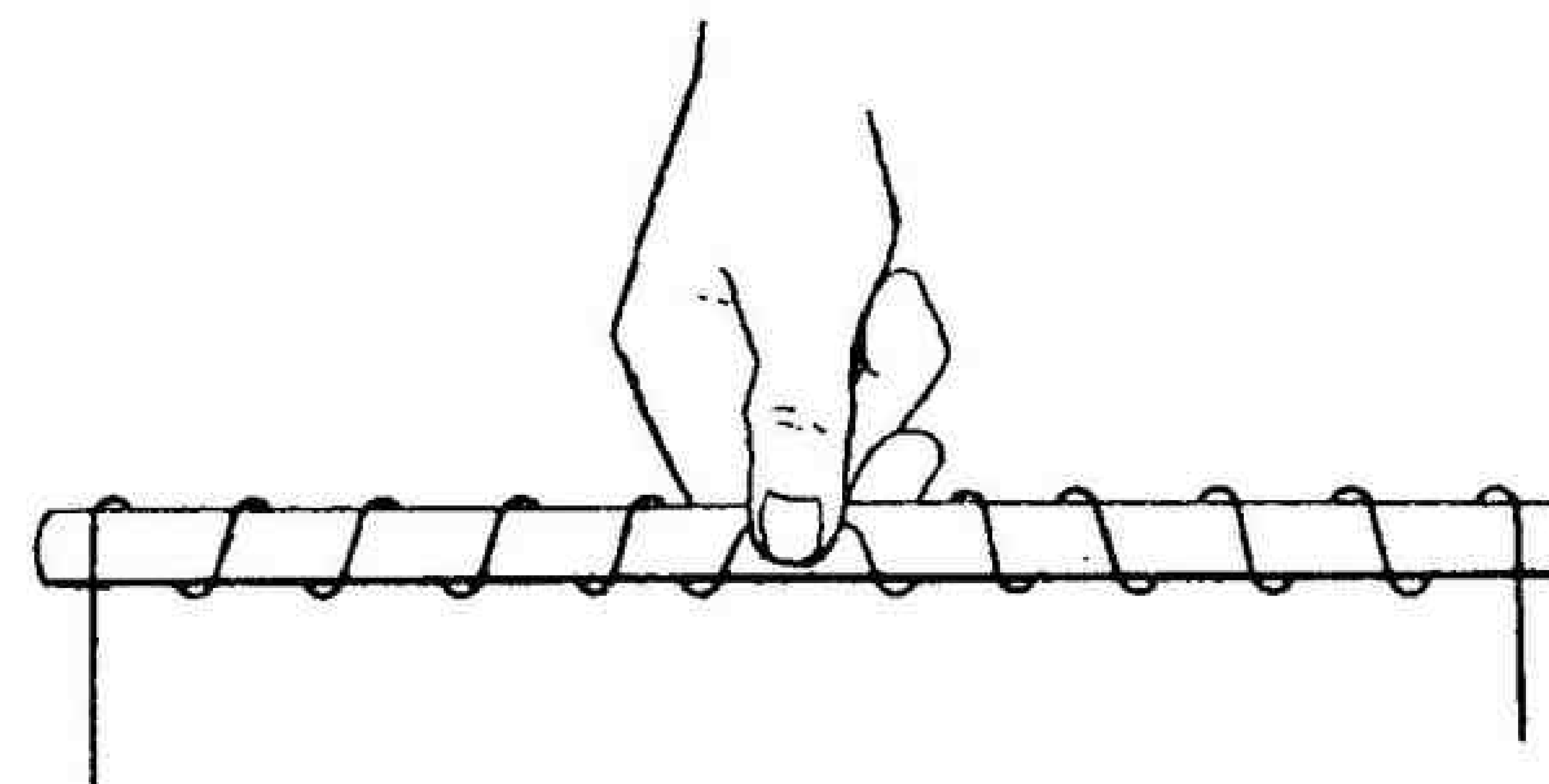


Fig. 66. El truco de la cuerda de Charles Howard Hinton.

de alguna manera por cada hélice se ha producido su hélice imagen especular. Las dos, la hélice y su imagen, pueden existir separadamente, pero supongamos que siempre que se produce una hélice también su hélice imagen se produce, y que ambas, cuando se reúnen, se aniquilan una a otra. Con esta concepción, exploremos el dominio de esas acciones que llamamos eléctricas."

Hinton procedió a aplicar esta descripción al encuentro de dos cargas eléctricas opuestas. Cada carga es un movimiento ondular de carácter helicoidal, pero la hélice no está en el espacio tridimensional; está en un espacio de más dimensiones. Una partícula cargada positivamente es, en una forma desconocida e inconcebible para nosotros, una imagen especular de una partícula cargada negativamente. Posee momento en el espacio de más de tres dimensiones. Por esta razón, conforme con la ley de acción y reacción, la producción de una partícula cargada exige la creación simultánea de su gemela especular. "Ningún cuerpo puede ser movido en una dirección cualquiera sin comunicar un movimiento igual, en dirección opuesta, a otro cuerpo –escribe–; por ejemplo, el movimiento de una bala de cañón es igualado por el retroceso del cañón. Y así no puede darse una torsión a las partículas de un cuerpo sin que se dé una torsión, imagen especular, a otras partículas."

Si imaginamos los cuerpos macroscópicos compuestos de partículas cargadas, entonces la inversión especular de un cuerpo resultaría, en lo que los físicos llaman "conjugación de cargas", un cambio de todas las cargas positivas en negativas y todas las negativas en positivas. Citaremos completo el pasaje más notable de Hinton:

"Si consideramos una hélice y su imagen, ellas no son más que el tipo más sencillo y rudimentario de un organismo. Lo que se afirma acerca de una hélice y su imagen vale también para ordenamientos más complicados. Si un fragmento de estructura aparentemente muy distinto de una hélice y con diversas partes y diferencias en él, si semejante estructura se reuniese con su estructura imagen especular, cada una de ellas desenrollaría a la otra instantáneamente, y lo que antes era un conjunto complejo y compuesto, opuesto a una imagen de sí mismo, se resolvería inmediatamente en una serie de partículas informes. Un relámpago, una llamarada, y todo habría terminado.

"Para darse cuenta de lo que esto significaría, hay que imaginar que en nuestro mundo hubiera por cada hombre, en alguna parte, un contrahombre, un retrato de sí mismo, una verdadera copia, aparentemente formada como él mismo, pero con su mano derecha

opuesta a la mano derecha original. Exactamente como la imagen del hombre en un espejo.

"Y entonces, cuando el hombre y su copia se encuentran, un súbito remolino, una llamarada, un poco de vapor y los dos seres humanos tras haberse 'desenrollado' mutuamente, no dejan nada más que un residuo de partículas informes."

¡El doctor Teller se reúne con el doctor Anti-Teller!

Hemos de recordar que Hinton escribía sobre cargas positivas y negativas, no sobre partículas y antipartículas (el concepto de antimateria no surgió hasta varias décadas después). Sin embargo, sus palabras tienen un curioso tono profético. Cuando un neutrino y un antineutrino se unen en un suicidio mutuo, seguramente ocurre algo análogo al truco de la cuerda de Hinton. Como los neutrinos intervienen en todas las interacciones débiles, ¿no es posible que todas las violaciones de la paridad observadas hasta ahora se deban, en alguna forma desconocida, a la influencia de la asimetría del neutrino? ¿Actúan los neutrinos como parteras a esos efectos diciendo a los electrones qué dirección hay que tomar y cómo tienen que girar sobre sí mismos? ¿O existe una asimetría más fundamental asociada de algún modo con la carga eléctrica?

La teoría de Hinton sobre las cargas positiva y negativa no es tan extravagante como parece. En 1921 el físico alemán Theodore Kaluza desarrolló lo que se conoce como la teoría pentadimensional de la relatividad. Cinco años después Oscar Klein, entonces en Estocolmo, generalizó la teoría de Kaluza tan ampliamente como para sugerir una explicación de las cargas positiva y negativa que tiene un notable parecido con la descripción de Hinton.

Es imposible explicar adecuadamente la teoría de Klein sin ecuaciones matemáticas, pero en forma tosca es algo así: además de las cuatro dimensiones espacio-tiempo de la teoría ortodoxa de la relatividad, hay una quinta dimensión de carácter espacial. Estas cinco dimensiones se curvan sobre sí mismas como la superficie de un cilindro o, más bien, como la superficie de un hilo fino, a causa de que el radio de curvatura es mucho más pequeño que el radio de un átomo (Klein calculaba un radio en 10^{-30} centímetros, lo que significa un centímetro dividido por la unidad seguida de 30 ceros). Los objetos macroscópicos están confinados en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones, pero las partículas elementales tienen lo que los físicos llaman "un grado más alto de libertad": nosotros podemos pensar en partículas capaces de moverse por esa quinta coordenada en una u otra dirección. Si se mueven en una di-

rección, están cargadas positivamente; si van en la otra, están cargadas negativamente.

Las partículas sin carga se mueven a lo largo de líneas geodésicas (las trayectorias más rectas posibles) a través del espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Podemos imaginar partículas cargadas que trazan geodésicas helicoidales a través del espacio-tiempo de cinco dimensiones. Dos partículas con cargas contrarias, que siguen un rumbo de colisión, tendrán líneas "del mundo" de mano contraria. Cuando se encuentran, sus respectivos momentos, por ser de direcciones contrarias, se anulan uno al otro, y ambas cargas desaparecen. Del mismo modo, si una partícula neutra adquiere carga, su momento origina un retroceso en otra partícula. El resultado son dos líneas geodésicas helicoidales de mano contraria a medida que se separan las dos partículas con carga opuesta.

Agreguemos inmediatamente que la teoría de Klein ganó pocas adhesiones, aunque promovió una importante polémica en los últimos años veinte [2]. El propio Einstein se interesó por ella durante algún tiempo, pero después decidió declararse contrario a ella. Yo lo menciono aquí solamente para mostrar que a la tosca descripción prerrelativista de Hinton se le puede dar una sofisticada formulación matemática. Ha habido muchas teorías de campo de la relatividad que han considerado las cargas positiva y negativa como dos gemelos enantiomorfos (por ejemplo, la teoría bosquejada en primer lugar por sir Arthur Eddington en su *Relativity Theory of Protons and Electrons*, Cambridge University Press, 1936). Hasta ahora no se ha considerado satisfactoria esa teoría. Sin embargo, entre algunos físicos hay una sospecha creciente de que la descripción de imagen especular de la carga puede todavía demostrar que es, como el blanco circulito de Yang dentro de la negrura del Yin, una nota de verdad dentro de la falsedad general de tales teorías.

El neutrino y su antipartícula son genuinas imágenes especulares uno de otro. ¿Es posible que de alguna manera –acaso en términos de un espacio y tiempo completamente distintos del espacio y tiempo que conocemos al nivel macroscópico– *toda* partícula sea una fiel imagen especular de su antipartícula? ¿Es posible que la antimateria no sea más que la materia ordinaria con toda su estructura espaciotemporal, hasta el último detalle, trastocada como por un espejo?

Ningún físico está dispuesto a dar un firme "sí" a estas cuestiones; sin embargo hay indicios que señalan en esa dirección. Desde 1957, una serie de experimentos han indicado que si en las sustancias empleadas en algún efecto que viola la paridad se trastocan las cargas (las cargas positivas convertidas en negativas y viceversa), entonces la "mano" del experimento también cambia. Podemos aclararlo imaginando un gran espejo vertical en la pared de la habitación donde la Dra. Wu realizó su experimento. La emisión de electrones en el experimento tiene una lateralidad, que es invertida por el espejo. El experimento no es superponible a su imagen especular. Pero si imaginamos que al otro lado del espejo una Dra. Anti-Wu realiza el mismo experimento, con instrumentos y sustancias hechos de antimateria, entonces los electrones irán "del otro lado". La simetría de las leyes básicas de la naturaleza queda restablecida.

Yang lo ha expuesto así. Si definimos la reflexión especular como una inversión derecha-izquierda *más una inversión de carga*, la simetría se conserva. Tal restablecimiento de la simetría por doble inversión (espacio y carga) ha sido subrayada también por Eugene Wigner, en Princeton, y L. D. Landau en la URSS[3] Desde luego, y Yang se da perfecta cuenta, esto no es más que una declaración verbal que nada, en absoluto, nos dice sobre *por qué* la adición de la inversión de carga a la inversión especular habría de restablecer la simetría.

Si –y éste es un gigantesco sí– la diferencia entre carga positiva y negativa resultase ser una sencilla distinción derecha-izquierda de alguna clase, como Hinton sugirió, entonces el nuevo tipo de reflexión especular definido por Yang resultaría ser solamente una simple, anticuada, familiar inversión especular. "Es fácil ver –escribe Landau (en el trabajo citado en la nota)– que la invariabilidad de las interacciones respecto a la inversión combinada deja al espacio completamente simétrico, y únicamente las cargas eléctricas serán asimétricas. El efecto de esta asimetría sobre la asimetría del espacio no es mayor que el debido al estereoisomerismo químico." Esto nos serviría de mucho para explicar el misterio de la conservación de la carga. Una unidad de carga, si fuese una estructura asimétrica estable, no se convertiría en una carga contraria, lo mismo que un neutrino de la mano izquierda no se convierte en su gemelo de la mano derecha. Únicamente puede desaparecer al combinarse con su gemelo. Y podría crearse únicamente en combinación con su gemelo.

Si la antimateria es materia reflejada, entonces podemos responder a la pregunta de Alicia: "¿Se puede beber la leche del espejo?" con un rotundo "¡No!" Esa leche, tocada por la mano o los labios de una Alicia produciría una explosión mayor que la bomba de hidrógeno. El infortunado Mr. Plattner de H. G. Wells, que se había

invertido en el espacio de cuatro dimensiones, habría sido aniquilado en el instante que volviera a nuestro mundo. Los astronautas de mi cuento publicado en *Esquire* no habrían tenido necesidad de hacer la prueba de la paridad para determinar si habían sido invertidos. Si lo habían sido, su nave espacial habría hecho explosión en el instante de aterrizar en el planeta.

En este punto, el lector interesado debe vencer el casi irresistible apremio de inventar teorías de inversión especular de la antimateria; teorías fundadas en la tosca imagen de una esfera que gira sobre sí misma. Nada es más fácil que idear esas ingenuas teorías. Basta únicamente imaginar, por ejemplo, que el extremo de un eje de rotación gira en un pequeño círculo; inmediatamente se crea una figura en la que se puede distinguir cuatro tipos de esferas giratorias: el giro del extremo del eje puede ir con o contra el giro de la esfera, y cada uno de estos casos tiene su imagen especular. ¿Todas estas formas son formas de los cuatro neutrinos? La respuesta es un "no" rotundo. La imagen de la esfera giratoria no es sustitutivo de la mecánica cuántica, y no se consigue más que malgastar el tiempo lanzándose a donde los físicos informados matemáticamente temen pisar.

¡Cómo habría disfrutado Pasteur con la violación de la paridad! Como hemos visto en el capítulo 16, tenía una fuerte intuición de que en la estructura del Universo existe una lateralidad fundamental, y pasó muchos años tratando de probarlo. Hoy los bioquímicos no creen ya, como Pasteur, que sea necesario investigar tan profundamente para encontrar una explicación de la asimetría de las moléculas orgánicas. Hay explicaciones más sencillas y más plausibles que no invocan la asimetría de las partículas elementales o una torsión en el espacio mismo. Sin embargo, no se puede descartar por completo la posibilidad de que cualquiera que sea la causa de la asimetría de las interacciones débiles, puede también desempeñar un papel en la formación de los compuestos orgánicos primitivos. Acaso no pase mucho tiempo antes de que la exploración de otros planetas arroje luz sobre esta cuestión. Si, por ejemplo, los astronautas encontraran en Marte aminoácidos "a derechas" (en vez de "a izquierdas" como en la Tierra) sería difícil creer que la asimetría al nivel de las partículas pudiera ser un factor que determinara la lateralidad de las moléculas orgánicas[4].

Al dar cuenta de las dos explicaciones contrarias sobre la preferencia izquierda-derecha en las interacciones débiles –la teoría de la torsión del espacio y la teoría de la torsión de las partículas–, he podido dar la impresión de que las dos concepciones se excluyen mutuamente. No es necesariamente así. El espacio puede ser asimétrico, y ello, a su vez, determinar la estructura asimétrica de las partículas y la naturaleza de la carga positiva y negativa. Si así ocurre, y si la "mano" del espacio es uniforme en todo el Cosmos, puede ser que las antipartículas vayan "contra la veta", por decirlo así, de modo que es difícil que existan. La antimateria puede ser completamente inestable en nuestro "torsionado" espacio-tiempo, lo que descartaría la posibilidad de antigalaxias. En el Universo entero la materia tendría lateralidad uniforme. Sin embargo, recientes experimentos con antiprotones en el CERN parecen mostrar un antiprotón estable, y sugieren que nada en la estructura del espacio-tiempo impide la existencia de la antimateria. La mayoría de los físicos, tal vez sólo porque están tan acostumbrados a la simetría al nivel macroscópico, encuentran algo feo e insatisfactorio en esta visión de un Universo en el que todas las cosas se orientan en la misma dirección. Uno de los aspectos más atractivos del espacio simétrico es que permite la existencia de anti-galaxias. Nótese: únicamente *permite* su existencia, no la garantiza. Por alguna razón histórica desconocida, todas las galaxias pueden seguir la misma dirección, como todos los aminoácidos en la Tierra, aunque puedan, en teoría, seguir la otra.

En este punto, las especulaciones acerca de la posible existencia de antigalaxias se asocian con las teorías relativas al origen del Universo. En el modelo de Universo estacionario (hoy desechado) era posible adoptar cualquiera de ambos puntos de vista. Según dicho modelo, continuamente ha de estar creándose hidrógeno, para impedir que el Universo se enrarezca al expandirse. Si el espacio fuese asimétrico, siempre se crearía hidrógeno, nunca antihidrógeno. Si el espacio fuese simétrico podrían producirse ambos tipos de hidrógeno, pero las moléculas de antihidrógeno quedarían aniquiladas al entrar en contacto con el hidrógeno ya presente.

El descubrimiento de la radiación de micro-ondas fondo, que es un leve resplandor residual del *Big bang* o "Gran explosión", obligó a desechar el modelo de Universo estacionario, y por ello las teorías actuales acerca de las antigalaxias se encuadran todas en el contexto del *Big bang*. La astrofísica sueca Hannes Alfvén, en su libro *Worlds-Antiworlds* (W. H. Freeman, 1966) y en "Antimatter and Cosmology" (*Scientific American,* abril de 1967), desarrolla y elabora un enfoque metagaláctico que tiene su origen en Oscar Klein. En esta teoría, no sólo puede el Cosmos contener igual número de ga-

laxias y antigalaxias entremezcladas, sino que incluso una galaxia podría albergar una mezcla a partes iguales de estrellas y antiestrellas.

Por el momento no tenemos forma de estar seguros de que no existen antigalaxias, o de que la antimateria no esté floreciendo en los núcleos de algunas galaxias, o desempeñe un importante papel en la fantástica producción de energía de los quásares. Empero, por diversidad de razones, hay consenso entre los especialistas en que tales posibilidades son inverosímiles. Por doquier, en el Universo parece haber solamente materia. ¿Por qué?

Éste es un gran interrogante, pendiente de respuesta. Si el espacio es asimétrico, o si en las leyes fundamentales de la naturaleza existe una asimetría intrínseca, no hay misterio en la inexistencia de antimateria. A los físicos, sin embargo, la simetría les es muy querida. Las dos ideas anteriores son ofensivas para su sentido de la belleza, y ello a pesar de que los acontecimientos del Universo parecen tener lugar en un único sentido en lo concerniente al tiempo. De ello hablaremos en el próximo capítulo. Una posible vía de salida sería atribuir el sesgo tomado por el Universo a acontecimientos fortuitos ocurridos en los primeros minutos inmediatamente posteriores al *Big bang*.

Si lanzamos un millón de monedas, es extremadamente improbable que salgan exactamente medio millón de caras, y ello aunque ninguna de las monedas esté sesgada. De modo análogo, la explosión primigenia pudo haber creado un ligero exceso de partículas sobre el número de antipartículas. Conforme la bola de fuego fue enfriándose, partículas y antipartículas se eliminaron unas a otras en cantidades iguales, dejando un exceso de partículas, que se convertiría en nuestro Universo.

Una opinión que rivaliza con ésta es la de que entre materia y antimateria existe una fuerza de rechazo. Una de las primeras propuestas fue que ambas clases de materia pudieran repelerse gravitatoriamente. De ser así, se violaría la teoría de relatividad general, por lo que los físicos sintieron no poco alivio cuando los experimentos descartaron tal conjetura. No hay por el momento pruebas de que exista ningún tipo de fuerza repulsiva, si bien la idea de que la bola de fuego se escindió en dos partes, una de materia y otra de antimateria, sigue todavía fascinando a muchos científicos, por no hablar de los escritores de ciencia ficción.

Nada menos que en 1956, ¡antes del descubrimiento de la violación de la paridad!, Maurice Goldhaber propuso que en el comienzo

mismo del tiempo hubo un “universon”, que se escindió por la mitad, produciendo un “cosmon” y un “anticosmon”. Ambos se repelieron mutuamente, separándose a gran velocidad. A lo largo de miles de millones de años, cada uno de ellos se fragmentó en un Universo.

Nosotros vivimos en el cosmon. En algún lado, acaso para siempre fuera del alcance de nuestra observación, está el vasto anticosmon, donde todas las cosas van en la otra dirección. ¡El conjunto de la existencia es un Sr. Partido gigante, impensable, que está dividido y nunca recuperará su figura completa!

25. El fin de la invariancia temporal

Sabemos que la paridad no se conserva; que en nuestra galaxia existen fuerzas causantes de torsión o asimetría en determinadas interacciones entre partículas. Hay razones de peso para creer que en galaxias de antimateria tales torsiones tendrían sentido contrario. Sabemos que al menos un tipo de partícula, el neutrino, en cada una de sus cuatro inexplicables formas, tiene estructura asimétrica. Por qué la inversión de la carga eléctrica habría de permutar también derecha e izquierda, es algo que nadie sabe. La hipótesis de que el propio espacio sea asimétrico suscita graves objeciones. No menos graves dificultades se presentan al tratar de explicar la existencia de carga positiva y negativa por inversiones de lateralidad derecha-izquierda en estructuras asimétricas estables. La hipótesis de que la reflexión especular de la materia, en el sentido de pura inversión de la orientación espacial, pueda también invertir la carga eléctrica, no es por el momento más que una expectativa bienintencionada.

En su espléndido librito sobre partículas elementales (*Elementary Particles,* Princeton University, 1962) Yang nos recuerda la sorpresa de Mach al observar por vez primera el comportamiento asimétrico de una aguja magnética en el campo que rodea a una corriente de electricidad. El misterio se esclareció, señala Yang, y la simetría quedó restablecida cuando se alcanzó a comprender más profundamente la estructura de la materia. En nuestros días, los físicos confían en que los misterios de la lateralidad y de la carga eléctrica acabarán desvaneciéndose cuando se logre una comprensión todavía más profunda de la estructura. "Hay ruedas dentro de las ruedas", opinaba Teller en una conferencia pronunciada en 1957, "pero la auténtica sorpresa que nos reserva la estructura se deberá

a que inesperadamente, y tras muchos pasos intermedios, el todo se nos aparecerá con notoria sencillez."

En lugar de simplificarse, la situación se complicó súbitamente en 1964. Ese año, un grupo de físicos de la Universidad de Princeton dio con pruebas de que otra de las leyes básicas de la simetría, la invariancia del tiempo, parecía ser también violada en ciertas interacciones débiles.

Para comprender las fantásticas implicaciones de este nuevo descubrimiento, tendremos que retroceder un poco en nuestro relato y examinar la violación de la paridad a la luz de un teorema fundamental de simetría conocido por teorema CPT. La C indica la carga eléctrica (positiva o negativa), la P, la paridad (izquierda o derecha), y la T, el tiempo (progresivo o regresivo). El teorema CPT afirma que, en todo proceso natural, si las tres simetrías experimentan inversión, el resultado es un proceso natural, que puede darse, y que sería indistinguible en todos los demás aspectos del proceso primitivo. Por "inversión temporal" los físicos entienden nada más que la inversión del sentido en que se mueven las partículas (u ondas). Una inversión CPT de un vaso de leche equivaldría a que todas sus cargas eléctricas cambiasen de signo (convirtiéndose así en antileche), a que su estructura sufriera una inversión de orientación, como si quedase reflejada en un espejo, y todos los movimientos cambiaran de dirección. Expresado con mayor verismo, como experimento de laboratorio, el teorema CPT diría lo siguiente: tomemos un microacontecimiento, descrito por el enunciado que contiene los términos C, P y T, y ciertas probabilidades. Cada uno de los términos va precedido de un signo más (+) o menos (–), para indicar su lateralidad, su carga, y el sentido de su progresión temporal. Cambiemos los tres signos, sin tocar para nada las probabilidades. El nuevo enunciado describirá un acontecimiento posible, a nivel microcósmico, en la naturaleza.

Antes de descubrirse la violación de la paridad, los físicos estaban convencidos de que si cambiara sólo uno de los signos, la nueva expresión continuaría describiendo aún algo factible por la naturaleza. La antileche sería idéntica a la leche, salvo por la inversión de su carga eléctrica. La leche reflejada seguiría siendo leche, aunque su estructura geométrica tuviera orientación contraria. La leche tiempo-retrógrada, cuyas partículas se moverían todas marcha atrás, también sería leche inalterada. Se creía que todas las leyes fundamentales de la física eran tales que, si en cualquier descripción matemática de un acontecimiento se invertía el sentido de progresión

del tiempo, se dispondría aún de la descripción matemática de algo observable.

"Las leyes [fundamentales] de la naturaleza son indiferentes respecto al sentido de progresión del tiempo", enunciaba Sir Arthur Eddington en 1927. "No hay más diferencia entre futuro y pasado que entre derecha e izquierda."

La violación del principio de paridad fue una sorpresa, pero la simetría global del Universo quedó rápidamente restablecida por el descubrimiento de que la inversión de paridad ha de ir acompañada de inversión de carga. Existen, o pueden existir, galaxias de antimateria, idénticas a la nuestra en todos los aspectos, excepto en que están invertidas respecto a la nuestra por lo que los físicos llaman un espejo CP, un imaginario "espejo" que transpone simultáneamente los signos de las cargas, y la paridad.

Los experimentos de Princeton de 1964 se referían a interacciones débiles en las cuales se violaba la simetría CP. Dicho con otras palabras, al ser permutadas simultáneamente las paridades y los signos de las cargas, el acontecimiento resultante no resultaba ser un duplicado exacto del primitivo. Las implicaciones de tal hecho son enormes, pues ahora la única forma de preservar la simetría CPT sería admitir que tampoco se conserva la invariancia del tiempo. El lector puede ver una explicación del razonamiento que respalda tal aserto en cualquiera de estos tres artículos, publicados en *Scientific American:* Eugene P. Wigner, "Violations of Symmetries in Physics" (diciembre de 1965); Oliver E. Overseth, "Experiments in Time Reversal" (octubre de 1969); o mi propia reseña, más modesta, "Can Time Go Backward?" (enero de 1967).

Lo explicaba yo con las tres piezas de un sencillo rompecabezas. Imaginemos un cuadrado dividido en tres rectángulos idénticos (figura 67, izquierda), que representan C, P y T. El cuadrado presenta simetría bilateral, y lo mismo los rectángulos. Al voltear (o lo que es igual, al reflejar en un espejo) cualquiera de los rectángulos, tal pieza seguirá encajando en el cuadrado, porque su forma no sufre modificación. La figura simbólica cómo imaginaban los físicos C, P y T antes de 1957.

El descubrimiento de la violación de la paridad (P) está indicado en nuestro modelo por la asimetría de la pieza P. Si dejásemos inalteradas C y T, la asimetría de P violaría claramente la simetría CPT. ¿Por qué? Porque no habría forma de ensamblar las tres piezas y componer con ellas un todo que permaneciera invariable al ser reflejado en el espejo.

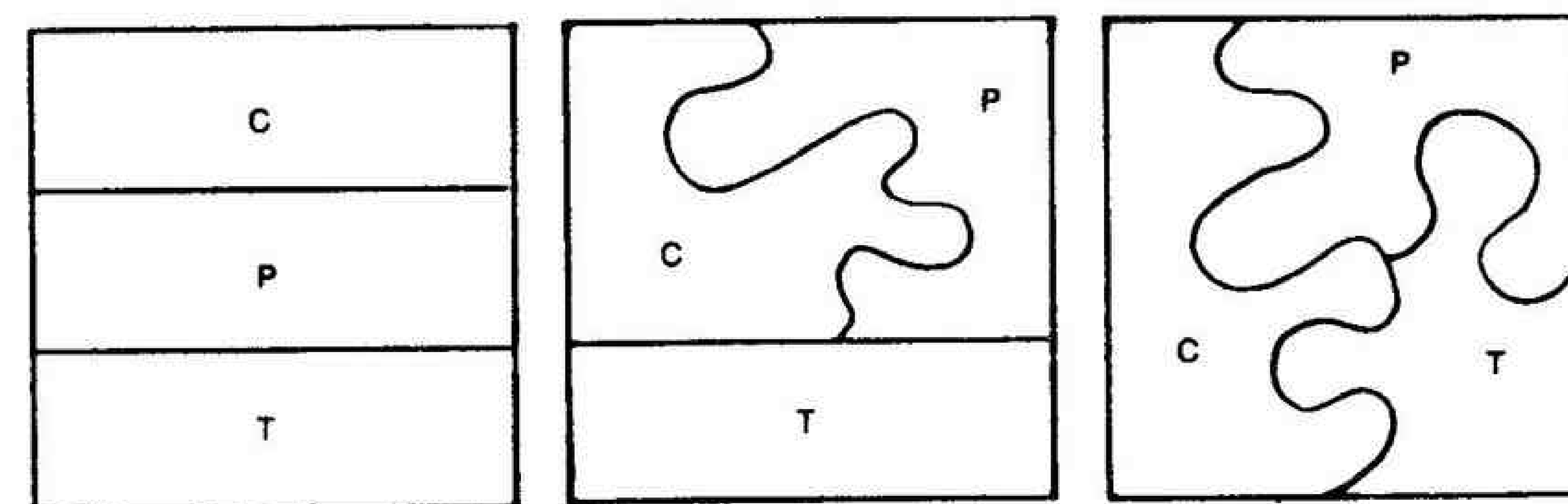


Fig. 67. Explicación, mediante un rompecabezas, de por qué la violación de la simetría CP conlleva la violación de la simetría temporal (T).

La figura del centro muestra cómo preservaron los físicos la simetría CPT.

En los experimentos se vio que a veces también la simetría de carga (C) es violada. En nuestro modelo, tal hecho se indica dándole a C forma asimétrica, aunque de modo que pueda acoplarse con la asimétrica P para crear un rectángulo simétrico más grande. La reflexión en un "espejo CP", que invierte conjuntamente la carga y la paridad, dejaría ahora invariable la forma compuesta por C y P. Al darle la vuelta al rectángulo CP seguiría encajando en el cuadrado, simétrico.

La tercera figura simboliza la reacción de los físicos tras la verificación, en 1964, de que tampoco la forma de CP era simétrica. ¿Cómo dejar a salvo la simetría del cuadrado CPT? Simplemente, suponiendo que la pieza es asimétrica lo mismo que las otras dos. En la tercera figura, si se diera la vuelta a una de las piezas, y a una de las parejas, la simetría total del conjunto quedaría violada. Pero si se diera la vuelta a la vez a las tres piezas trabadas entre sí, el cuadrado seguiría siendo un cuadrado. La simetría CPT quedaría preservada.

Los físicos no habían observado directamente entonces, ni lo han hecho todavía, que T tenga forma tan curiosa. Pero al ver la extraña forma producida por la trabazón de C y P, y admitiendo que la simetría del sistema CPT haya de preservarse, la única solución era que también T fuera asimétrica. He aquí por qué los físicos dicen que las pruebas experimentales conllevan implícitamente la violación de la simetría temporal, pero que ésta no ha sido directamente observada. Por ello, todavía confían en que la reflexión en

un mágico e imaginario "espejo CPT" dejará inalterados todos los procesos fundamentales de la naturaleza.

Tomemos una piedra e invirtamos su estructura bilateral. Cambiemos de signo cada una de sus cargas eléctricas, e invirtamos la dirección de todo cuanto dentro de la piedra esté moviéndose. El resultado es una piedra auténtica, capaz de existir, aunque no por mucho tiempo si se encontrase en nuestra porción del Universo. Evidentemente, nadie sabe lo que ocurre cuando la estructura bilateral sufre hasta en su más mínimo detalle una inversión izquierda-derecha por reflexión especular. Ni nadie tiene la más leve noción de cuáles son los cambios básicos que se producen cuando se da una inversión de carga. Empero, parece ahora esencial una *asimetría* del tiempo para preservar la simetría global del sistema CPT.

Es importante comprender que si los físicos luchan por preservar la simetría CPT no lo hacen por amor a la simetría. Cierto es que muchos físicos encuentran feo e insatisfactorio suponer que el mundo se encuentre desproporcionado y desequilibrado en aspectos fundamentales; pero el deseo de preservar la simetría CPT se funda en mucho más que eso. El teorema CPT se encuentra tan firmemente arraigado en los fundamentos de la teoría de la relatividad, que si resultase no ser cierto, la teoría física se tambalearía. "Se desencadenarían todos los infiernos", fueron las palabras con que Abraham Pais lo expresó en cierta ocasión.

He aquí el estado actual de la cuestión. No se han descubierto pruebas evidentes de que un microevento no pueda ir también marcha atrás. Se ha comprobado que en ciertas interacciones no se conserva la simetría CP. En la hipótesis de que la simetría CPT se conserve, la violación de CP implica la violación de T. Parece que no existen métodos adecuados para poder preservar la simetría especular CP sin combinarla con una T asimétrica.

Antes de examinar algunas de las más fantásticas implicaciones de todo esto, pueden ser de interés algunos detalles más acerca del histórico descubrimiento de 1964. El experimento fue realizado por un grupo de físicos de Princeton, dirigidos por Val L. Fitch y James W. Cronin, que trabajaban en el Brookhaven National Laboratory. En palabras de Jeremy Bernstein, estos físicos se valieron de "los mismos miserables mesones *K* que provocaron el rompecabezas theta-tau, del que surgió la violación de la paridad". Aproximadamente una vez de cada quinientas, el mesón neutro *K*-2 (un mesón *K*-2 sin carga eléctrica) se descomponía en dos mesones pi de cargas opuestas, en lugar de tres mesones pi, como todo el mundo esperaba. El

mesón neutro *K*-2 tiene un valor de CP igual a −1. Los dos mesones pi tienen un valor CP de +1. Un estado de CP de −1 se convertía en un estado de CP de +1, violando así la invariancia de CP. En 1980 Fitch y Cronin recibieron el premio Nobel por este trabajo.

¿En qué medida afecta al problema de Ozma la violación del principio de conservación de CP, y presumiblemente de T? Hay varias posibilidades. Una, que el Universo no contenga galaxias de antimateria. De ser así, existe, como hemos visto, un procedimiento por el que nosotros y los habitantes de cualquier planeta podríamos llegar a una comprensión común de las nociones de izquierda y derecha.

Una segunda posibilidad es que el Universo contenga galaxias de antimateria en las cuales, a nivel microscópico, ciertos acontecimientos ocurran con inversión temporal (los movimientos se desarrollan en sentido contrario) con relación a los mismos sucesos de aquí, mientras que todos los macroeventos continúan desarrollándose en el mismo sentido que en la Tierra. En este caso, el problema de Ozma estaría resuelto. Lo único que tenemos que hacer es pedirle a los habitantes del planeta X que realicen un experimento que comporte la violación de CP. Si su descripción concuerda exactamente con lo que aquí sucede, el planeta X estará compuesto de materia. Si no, sería de antimateria. En ambos casos podemos probar experimentos que darán lugar a definiciones claras de izquierda y derecha.

Una tercera posibilidad –y nos lanzamos ahora a la pura fantasía– es que el Universo contenga galaxias de antimateria en las cuales todos los acontecimientos, micro y macroscópicos, estén retrogradados con respecto a lo que Eddington llamó nuestra "flecha del tiempo". Al menos en teoría, dos galaxias podrían estar en inversión temporal una respecto de la otra. En cada una de ellas, criaturas inteligentes podrían contemplar su mundo, como nosotros el nuestro, progresando en el tiempo, desde el pasado hacia el futuro. En cambio, encontrarían que los sucesos se desarrollan en sentido contrario en la *otra* galaxia.

Antes de poder hablar con algún sentido de tan descabellada posibilidad, y considerar si dos galaxias de flechas temporales opuestas podrían llegar a tener noticia una de la otra, será preciso examinar más cuidadosamente la naturaleza del tiempo. ¿Qué significado tiene decir que el tiempo va en una dirección? ¿Hay tan sólo una flecha temporal, o hay muchas? Si son muchas, ¿qué relación tienen unas con otras? Nuestra exploración de las nociones de derecha e izquierda toca a su fin, y es ya hora de dejar las más lejanas fronteras de la ciencia e internarnos en misterios más trascendentes.

26. Las flechas del tiempo

"... tiempo, tiempo oscuro, tiempo secreto, en eterno fluir, como un río..."

THOMAS WOLFE
The Web and the Rock

Muchas han sido las metáforas utilizadas para describir el tiempo, pero ninguna más antigua y persistente que la imagen del tiempo como un río. No es posible bañarse dos veces en el mismo río, decía Heráclito, filósofo griego que insistió en la inestabilidad temporal de todas las cosas, porque nuevas aguas fluyen continuamente en torno nuestro. No es posible siquiera bañarse en él una vez, añadía su discípulo Cratilo, porque mientras nos metemos en él, tanto nosotros como el río estamos cambiando y convirtiéndonos en algo diferente. Así lo expresa Ogden Nash en su poema *Time Marches On (El tiempo sigue su camino)*:

Mientras las damas se ponen las medias,
las damas que fueron se han ido ya.

En *Finnegan's Wake*, de James Joyce, el gran símbolo del tiempo es el río Liffey, que pasa por Dublín, con sus "aguas que van acá y allá" para alcanzar el mar en las últimas líneas y retornar después a *river-run* ("río-corre"), la primera palabra del libro, recomenzando así el ciclo interminable del cambio.

Es un símbolo poderoso, pero también un símbolo que induce a confusión. No es el tiempo el que fluye, sino el mundo. "¿En qué unidades habrá de medirse el fluir del tiempo?", preguntaba el filósofo australiano J. J. C. Smart. "¿En segundos por —?" Decir que "el tiempo pasa" es como decir que la "longitud se extiende". Como Austin Dobson hace notar en su poema *The Paradox of Time (La paradoja del tiempo)*:

¿Qué el tiempo pasa, me dices? ¡Ay, no!
Pasamos nosotros, el tiempo no.

Además, mientras los peces pueden remontar el río, nadando contra corriente, nosotros no tenemos el don de penetrar en el pasado. El mundo, siempre en perpetuo cambio, se parece más a la mágica alfombra verde que transportó a Ozma a través del Desierto Mortal (¿el vacío de la nada?), desenrollándose sólo por delante, y arrollándose sólo por detrás, mientras Ozma viajaba desde Oz a Ev, caminando siempre en la misma dirección sobre la diminuta región verde de la alfombra, el "ahora"[1].

¿Por qué nunca se arrolla hacia atrás la alfombra mágica? ¿Cuál es el fundamento físico de esta extraña y nunca vulnerada asimetría del tiempo?

Hemos visto cómo recientes experimentos de laboratorio sugieren que hay en el microcosmos ciertas interacciones débiles que sólo pueden ir en una dirección. Así pues, en estos acontecimientos parece estar incardinada una flecha temporal de algún tipo. Empero, aparte estas anomalías extremadamente raras, todas las leyes fundamentales de la física, incluida la relatividad y la mecánica cuántica, son reversibles en el tiempo. Es decir, que en el enunciado de cualesquiera de estas leyes fundamentales podemos sustituir el tiempo t por $-t$, y la ley seguirá siendo tan aplicable al mundo como antes: describirá algo que puede darse en la naturaleza.

Cuando nos fijamos en los acontecimientos que ocurren a nivel macroscópico, el contraste resulta inmediatamente obvio. Hay siempre una flecha temporal, que apunta desde lo que llamamos pasado hacia lo que conocemos por futuro. Decir que la flecha temporal apunta siempre en esta dirección es una tautología, porque pasado y futuro están definidos por esa flecha. Pero no es ésa la cuestión. La cuestión es que la flecha tiene punta. Hay una diferencia entre sus dos extremos.

La dirección de la flecha temporal es uniforme y omnipresente en los procesos de nuestra mente. Recordamos el pasado. No recordamos el futuro. Hice una pausa tras el último punto. Las frases recién escritas se encontraban sobre una hoja de papel amarillo, negras huellas del pasado. El resto de la hoja estaba en blanco. He mecanografiado ahora nuevas frases. El "ahora" de la última frase se encuentra ahora en el pasado. Y ahora, ese último ahora se ha perdido en el pasado... y ahora... Todos y cada uno de nosotros tenemos siempre delante un futuro incierto, que no existe aún, mien-

tras el inalterable pasado está ido y terminado. Existió una vez. Ahora es evidente que ha desaparecido. Lo conocemos tan sólo por nuestros recuerdos y por las otras huellas que ha dejado en el presente. A partir de estas huellas podemos, en parte, reconstruir el pasado. Lo hacemos, es curioso, inspeccionando el futuro, pero tan sólo en el momento en que está entrando en el pasado. El mismo procedimiento misterioso –la inducción– que nos permite conjeturar cómo se comportará la naturaleza es el que se utiliza para presumir, también con la misma variable probabilidad, cómo la naturaleza se *ha* comportado.

No es sólo en nuestra consciencia donde la flecha del tiempo tiene orientación fija. Hay en el mundo exterior un sinfín de acontecimientos cuyo desarrollo sólo puede ser en una dirección. Pasemos marcha atrás una película de cine. ¿Habrá quien ponga en duda que jamás podremos ver el mundo que así se nos describe? Si en la acción hay personas o animales, instantáneamente se produce un efecto grotesco. Si no hay seres vivos que se muevan por la pantalla, puede que no sea fácil determinar que la película está siendo pasada al revés en tanto no aparezcan ciertos fenómenos inconfundiblemente unidireccionales: la caída de una hoja, de la lluvia o la nieve; las olas al bañar la playa y otras mil cosas que sólo pueden suceder en un sentido. ¿Por qué son reversibles respecto al tiempo las leyes fundamentales de la física –si se exceptúan unas cuantas interacciones débiles jamás halladas fuera del laboratorio–, mientras que a nivel macroscópico el Universo bulle de fenómenos irreversibles?

Antes de analizar las respuestas de los físicos a esta cuestión, hemos de desembarazarnos de una extravagante concepción presentada de cuando en cuando por algún matemático, filósofo o místico, aunque muy raramente por un físico: a saber, la opinión de que tan sólo en el conocimiento humano, en la dirección única del funcionamiento de nuestra mente, podremos hallar fundamento para la flecha temporal[2].

Los patrocinadores de esta idea suelen defenderla con un lenguaje tan incomprensible que resulta difícil saber a ciencia cierta lo que tratan de decir. Parece inverosímil que quieran negar la existencia de un vasto mundo, exterior a nuestras mentes humanas. Si se piensa seriamente que un árbol carece de existencia fuera de la propia mente, no habrá ninguna buena razón para admitir la existencia de ninguna otra mente. No hay modo lógico de refutar tal opinión; aunque sin duda el lector deberá convenir en que la creencia en el solipsismo no puede estar muy difundida. En efecto, en tal caso sería forzoso creer que tan sólo hay un solipsista: uno mismo.

¿Podré pues suponer, querido lector, que no es usted un solipsista, esto es, que no sólo acepta usted mi existencia, sino también la de un mundo real, exterior, no formado por mentes humanas? Si admite usted esto, bien podría admitir también que el mundo exterior está estructurado. Los mismos razonamientos que respaldan la creencia en la existencia de un árbol aun cuando ningún ojo lo esté mirando, sirven igualmente para apoyar la opinión de que el árbol tiene forma aunque nadie lo mire.

Evidentemente, sí tiene sentido decir que todo cuanto sabemos acerca del mundo exterior es lo que acontece en el seno de nuestras cabezas. El mundo exterior es siempre *inferido,* nunca directamente percibido. La información relativa a ese mundo se infiltra en nosotros a través de nuestros sentidos, es transmitida a través de canales peculiares por complicados procedimientos, y es finalmente interpretada por el cerebro. En este sentido, todo cuanto sabemos acerca del mundo dependerá de la mente. Pero decir tal cosa es decir algo evidente y trivial. El conocimiento, por definición, depende de la mente. Conocer algo es conocerlo con la mente. Si por *sonido* hemos de entender la sensación sonora en una mente, es obvio que un árbol situado allí donde ningún oído pueda oírlo no hace sonido. Si la palabra *forma* pretende expresar que una mente tiene conciencia de una forma, naturalmente que una nebulosa espiral no tiene forma. Si mediante *antes y después* pretendemos expresar la conciencia que la mente tenga del antes y el después, entonces, es obvio, llegar a ser, convertirse en, es algo que depende de la mente.

Mas, ¿qué se gana hablando en este lenguaje fenomenológico, tan poco habitual? Tal vez proporcione a ciertos filósofos una especie de placer perverso, por permitirles quejarse de no ser comprendidos por sus críticos, lo que a su vez sugiere que su penetración y fuerza intelectual es mayor que la de los críticos. Tanto para los científicos como para los barrenderos, el lenguaje fenomenológico sólo es fuente de enorme confusión. Un astrónomo menciona que la nebulosa de Andrómeda tiene un par de brazos espirales. Mal podremos culparle por enfadarse si alguien le interrumpe diciendo: "¡Un momento! ¡La noción de espiralidad es un concepto matemático de nuestra mente, no parte de la naturaleza!"

Lo mismo que las personas corrientes –y que casi todos los filósofos–, los científicos se expresan en lo que Rudolf Carnap gustaba llamar un "objeto-lenguaje", esto es, un lenguaje que presupone

un mundo externo y estructurado, formado por cosas independientes de nuestras mentes. Incluso el obispo Berkeley, quien tan persuasivamente argumentó que nada existe a menos que sea percibido, procedió rápidamente a restaurar el total del Universo exterior, juntamente con sus intrincadas propiedades matemáticas, admitiendo que es percibido por Dios.

El aspecto que quiero claramente destacar es que la "flecha temporal" constituye una parte tan legítima del mundo exterior como las relaciones espaciales. Lo que la flecha significa, a saber, la dirección única del acontecer de los sucesos, está ahí en el mismo sentido en que lo están grande y pequeño, caliente y frío, rápido y lento, luz y oscuridad, derecha e izquierda, y todas las demás relaciones estructurales del mundo. ¿Tuvieron nietos los dinosaurios? Si fue así, las abuelas dinosaurio fueron más viejas que sus nietos. Incluso el ahora estaba "allí", en el sentido de que, para cada dinosaurio, había un "ahora" al nacer.

Tal vez el subjetivista nos responda que "Sí, pero allí estaban las mentes de los dinosaurios para percibir el paso del tiempo". Muy bien. Retrocedamos más todavía en el tiempo. ¿Percibían los trilobites el paso del tiempo? ¿Y los seres unicelulares que poblaron los mares primigenios? Retrocedamos aún más. Marte es más antiguo que sus cráteres. El Sol, más antiguo que Marte. La galaxia de la Vía Láctea es más antigua que el Sol. De ser cierta la teoría de la "gran explosión" (*Big bang*), el Universo comenzó hace miles de millones de años con una monstruosa explosión, y ha estado expandiéndose desde entonces. La *conciencia* que tenemos de tal expansión depende, desde luego, de la mente, pero, ¿por qué molestarnos en afirmar lo que es obvio?

Está claro que la flecha temporal que orienta nuestro pensamiento señala en igual dirección que la flecha temporal del exterior. La superficie marciana guarda un registro del pasado. También lo llevan las células de nuestro cerebro. ¿Por qué concuerda la dirección en que ambas apuntan? A excepción de unos cuantos subjetivistas, todos contestarían, en el lenguaje objetivo de la ciencia, que así es porque nuestros cerebros están formados de la misma sustancia que el Universo, porque sus partículas danzan de acuerdo con las mismas leyes. Nuestra conciencia del tiempo depende de la memoria, del recuerdo, y éste no es sino una especie de complicada huella. Sin duda sería preciso algún extraño tipo de narcisismo para suponer que sea nuestro pequeño y débil cerebro el que imponga al Cosmos su flecha temporal, y no a la inversa.

Si el lector conviene en que el llegar a ser es parte de la naturaleza, e independiente de nuestras mentes, podremos volver a la cuestión de partida. Dado que las leyes fundamentales de la física (salvo las raras excepciones que hemos señalado) son temporalmente reversibles, ¿qué es lo que hace avanzar a la naturaleza siempre en la misma dirección? ¿Por qué en la naturaleza son tantos los acontecimientos que sólo se verifican en un sentido?

Parte de la respuesta, y quién sabe si toda ella, está profundamente ligada a las leyes de la probabilidad. Ciertos acontecimientos se producen sólo en un sentido no porque sea imposible que ocurran en sentido inverso, sino porque es extraordinariamente improbable que así lo hagan. Para captar lo que con esto se quiere decir, no conozco mejor método que realizar unos cuantos experimentos simples con una baraja.

Tomemos un "mazo" de naipes formado sólo por el as de picas. "Barajemos" este mazo tanto como queramos, y examinemos después la "ordenación" de las cartas, desde lo alto a lo bajo del paquete. La probabilidad de que sea todavía el as de picas es igual a 1 (certeza). Repitamos ahora el mismo procedimiento con el as y el dos de picas. La situación empieza ya a hacerse misteriosa. Tras barajar lo suficiente para que el orden de las cartas de este mazo de dos sea aleatorio, la probabilidad de que la serie, leída de arriba a abajo, sea as-dos es $1/2$. También es igual a $1/2$ la probabilidad de que el orden sea dos-as.

Volvamos a probar con el as, el dos, el tres y el cuatro de picas, comenzando con las cartas en ese orden, de arriba a abajo. El número de ordenaciones de cuatro naipes es de $1 \times 2 \times 3 \times 4 = 24$ combinaciones. Hay una probabilidad entre 24 de que, tras barajarlo concienzudamente, el orden de los naipes del paquete sea 1 - 2 - 3 - 4. Si seguimos barajando y examinando regularmente el mazo, descubriremos que, a la larga, aproximadamente una de cada veinticuatro veces las cartas estarán en el orden 1 - 2 - 3 - 4 (o en cualquier otro orden previamente especificado).

El número de formas en que pueden ordenarse n objetos es $n!$ (léase factorial de n). El tamaño de las factoriales crece a un ritmo fantástico. Con una baraja ordinaria de 52 cartas, la probabilidad de que tras barajar una vez de manera aleatoria el mazo vuelva a su estado inicial es de $1/52!$, o sea, 1 dividido por 8 seguido de 67 cifras. Si abrimos una baraja nueva, anotando el orden en que figuran las cartas, y barajamos después concienzudamente, podemos apostar sobre seguro a que el orden primitivo se ha perdido irreme-

diablemente. Nada hay en las leyes de la física que impida al mazo retornar a su ordenación inicial; tan sólo lo impiden las leyes del azar. Si se barajara el mazo durante suficiente tiempo, por una máquina mezcladora, pongamos por caso, funcionando durante algunos millones de años, quizás alguna vez quedara restaurada la ordenación primitiva. Más aún, un famoso teorema de Poincaré afirma que, con tiempo suficiente, es seguro que se retornaría al orden primitivo tantas veces como se quiera especificar. Si se siguiera barajando las cartas indefinidamente por toda la eternidad, se retornaría a tal ordenación un número infinito de veces.

Siempre que un gran número de objetos interactúan aleatoriamente unos con otros, la probabilidad introduce en el tiempo una dirección única. Una forma popular de explicarlo consiste en describir lo que acontece al principio de una partida de billar americano. Imaginemos que se filma la ruptura de la perfecta formación triangular de las quince bolas numeradas, al ser impactadas por la bola roja. Las bolas se dispersan acá y allá, y la bola ocho, pongamos por caso, cae por una de las troneras y rueda hacia abajo. Al pasar la película marcha atrás, todos se darán cuenta instantáneamente de que la película corre al revés. Ningún jugador de billar ha visto jamás que estando las bolas esparcidas por la mesa, en una jugada las bolas, tras rodar por el paño verde, acaben congregándose y formando el triángulo. La cuestión fundamental es que ninguna ley física lo impide Si no ocurre así, es tan sólo porque resulta extraordinariamente improbable.

¿Y qué pasa con la bola número ocho, que cayó por la tronera? Seguramente, cabría responder que las leyes físicas prohíben que se caiga de la red de recogida, y que rodando cuesta arriba, vaya a reunirse con las demás. Pues no. Como antes, las causas que impiden que eso suceda son de carácter probabilístico. Debemos ahora imaginar las moléculas como billones y billones de microscópicas bolitas que se mueven por el espacio en todas direcciones, chocando y rebotando unas contra otras. Pensemos en un matraz lleno de cierto gas. Destapamos el frasco y, al poco, las moléculas de gas, moviéndose al azar, se habrán distribuido uniformemente por toda la sala. No vuelven por sí solas a concentrarse en el matraz que las contenía por la misma razón por la que al barajar las cincuenta y dos cartas no se recompone su ordenación primitiva. Es demasiado improbable. Imaginemos que, súbitamente, cada una de las moléculas de gas de la habitación invirtiera el sentido de su movimiento. Las moléculas escapadas del matraz *retornarían* a él. En principio,

la difusión gaseosa es reversible en el tiempo. Si en la práctica no se da, es a causa de las leyes de la estadística y la probabilidad.

Veamos cómo aplicar esto a la octava bola. Una vez que todas las bolas hayan dejado de moverse, imaginemos que se invierten los movimientos de todas las moléculas que intervienen en este acontecimiento. Debajo de la mesa, en el punto donde la octava bola llegó al reposo, las moléculas que absorbieron el calor y el impacto convergerían todas, creando una minúscula explosión. Tal explosión enviaría a la bola rodando cuesta arriba por la pendiente. A lo largo del camino de subida, las moléculas que antes transportaron y retiraron el calor de fricción se moverían hacia la bola, reforzando y contribuyendo a su movimiento. La octava bola saltaría de la tronera, reuniéndose con las otras, que de modo análogo habrían sido puestas en movimiento, y todas juntas irían rodando de acá para allá sobre el paño, hasta converger y apiñarse en la formación triangular inicial. El impacto global producido en la convergencia dispararía hacia atrás la bola roja, hasta el cuero del taco.

En una película que nos mostrara el comportamiento individual de cada molécula que participa en este suceso no aparecería nada de anormal. No se violaría ninguna ley física. Pero cuando pensamos en los trillones de moléculas en movimiento caótico que participan en el acontecimiento, la probabilidad de que todas ellas se muevan simultáneamente como se ha explicado, para invertir la evolución temporal del fenómeno, es tan cercana a cero, que de ocurrir tal cosa creeríamos haber visto un milagro.

Dado que la fuerza de la gravedad es de sentido único, siempre de atracción y nunca de repulsión, cabría pensar que el movimiento de los cuerpos por influjo de la gravedad no puede ser invertido sin infringir leyes fundamentales. No es así. Invirtamos el sentido de traslación de los planetas, y continuarán girando en torno al Sol, describiendo exactamente las mismas órbitas. Tal reversibilidad es la que permite a los astrónomos determinar exactamente cuándo se produjeron eclipses en el pasado.

¿Y qué decir de las colisiones de objetos arrastrados hasta chocar por la gravedad, la caída de un meteorito, por ejemplo? Sin duda que este suceso *no* es tiempo-reversible. ¡Pero sí que lo es! Cuando un gran meteorito se estrella contra la Tierra, se produce una explosión. Billones de moléculas se esparcen acá y allá. Invirtamos el sentido del movimiento de todas las moléculas, y el impacto de todas ellas en un solo lugar proporcionará la cantidad exacta de energía para devolver al meteorito a su órbita. Un huevo cae de un

muro, como Humpty Dumpty, y se despachurra en el suelo. Invirtamos la marcha de todas las moléculas de este suceso, y el huevo volverá a recomponerse, saltando hasta lo alto del muro. No hay en tal recomposición violación de las leyes fundamentales; tan sólo, de leyes estadísticas.

Así pues, es aquí, en las leyes de la probabilidad, donde muchos físicos encuentran fundamento definitivo para la existencia de una flecha temporal. La probabilidad explica procesos tan aparentemente irreversibles como la mezcla del café y la leche, la ruptura de un cristal de ventana de una pedrada y todos los demás acontecimientos familiares, unidireccionales e irreversibles, en los que intervergan elevado número de moléculas. La probabilidad explica la segunda ley de la termodinámica, que enuncia que el calor se mueve siempre desde las regiones más calientes a las más frías. Y explica por qué se destruye el orden de un mazo de naipes al barajarlos.

"Sin necesidad de ninguna mística invocación a la conciencia", declaraba Eddington (en la conferencia en que introdujo la noción de "flecha del tiempo"), es posible hallar en el tiempo una dirección... Tracemos una flecha arbitrariamente. Si al ir siguiendo la flecha encontramos cada vez más elementos de azar en el estado del mundo, es que la flecha está apuntando hacia el futuro; si los elementos de azar decrecen, la flecha apunta hacia el pasado. Ésta es la única distinción que la física conoce.

Eddington tenía perfecto conocimiento, como es obvio, de otra gran categoría de acontecimientos que siempre evolucionan en un sentido: acontecimientos en los que se irradia energía desde un foco emisor. Al arrojar una piedrecita en un estanque, se crean ondas que se expanden circularmente. Nunca vemos que en un estanque las ondas circulares se contraigan, converjan en una piedra y la propulsen fuera del agua. Pero, como antes, ello se debe a que tal suceso es improbable. En principio, dado el conjunto adecuado de condiciones iniciales, tal acontecimiento podría ocurrir en la realidad. Más aún, en el laboratorio, en la cubeta de ondas, es fácil crear en el agua ondas circulares que formen anillos cuya propagación sea en el sentido de contraerse a un punto. En la naturaleza, como es obvio, no podemos concebir acontecimientos en el borde del lago capaces de provocar semejante fenómeno, y no digamos ya todos los movimientos moleculares del agua que sería necesario invertir para llevar hacia arriba una piedra hundida, hasta el punto preciso en que las ondas convergentes habrían de enviarla fuera del agua.

La misma probabilidad casi nula explica otros mil sucesos de carácter radiactivo, cuya inversión sería posible en teoría, mas no en la práctica. Si un electrón, un protón y un antineutrón fuesen disparados desde el espacio con tan certera puntería que los tres atinasen en un mismo núcleo atómico, crearían un neutrón. Se observaría así una desintegración-beta con tiempo retrógrado. Nunca ha podido ser vista, no porque la naturaleza la prohíba, sino porque las condiciones iniciales para ello son demasiado improbables.

La radiación de una estrella servirá como ilustración de lo mismo a mayor escala. Jamás vemos que converja en una estrella energía procedente de todas las direcciones del universo, y que en ella se desarrollen reacciones nucleares retrógradas, que harían de la estrella un sumidero, y no una fuente, de energía. Tampoco en este caso hay leyes físicas fundamentales (incluidas las de relatividad y las de la mecánica cuántica) que impidan tal acontecimiento. Es tan sólo la improbabilidad de las condiciones iniciales la que lo hace imposible. Tendríamos que suponer que Dios (o los dioses), en algún continuo orden superior, puso en marcha todas las ondas en los confines del Universo. Sin tan improbables "condiciones de contorno" en los confines de las cosas, no hay forma de poner en marcha el proceso de radiación retrógrada.

A la máxima escala posible, la regular expansión del Universo es una radiación desde un centro, donde aconteció la explosión primigenia. Una vez más, no hay razón para que la materia del universo no pueda estar moviéndose en sentido contrario. Si se invirtiera la dirección del movimiento de todas las galaxias, hoy en recesión unas respecto a otras, el corrimiento hacia el rojo se convertiría en corrimiento hacia el azul, y el cosmos en contracción seguiría sin violar ninguna de las leyes fundamentales conocidas. Como veremos en el capítulo 28, muchos cosmólogos tienen la convicción de que llegará un día en que el Universo dejará de expandirse y comenzará a evolucionar en sentido contrario.

Para Eddington, todos estos procesos de radiación, desde las ondas concéntricas que se forman en la superficie del lago hasta la expansión del Universo, son sencillamente otros tantos ejemplos de movimiento tendente hacia el desorden. Al principio, las ondas cercanas a la piedra tienen un elevado nivel de ordenación. Conforme se propagan hacia el exterior están progresivamente menos ordenadas, hasta acabar finalmente por extinguirse. La luz emitida por un sol está cada vez menos ordenada a medida que en su propagación va siendo influida por otros cuerpos astronómicos y por la curvatura del espacio-tiempo. Si el espacio-tiempo fuera cerrado, a modo

de superficie esférica (tal como Eddington creía), la radiación de cada estrella acabaría por hacerse totalmente caótica. Considerado en su conjunto, argüía Eddington, el Universo se está expandiendo con regularidad y tiende a un estado de máximo desorden. Sea como fuere, Eddington estaba persuadido de que todos los acontecimientos del Universo físico que se desarrollan solamente en un sentido deben tal sentido a las leyes de probabilidad.

Y se suscita ahora una fascinante cuestión. Si la flecha macroscópica de tiempo está definida en función de la probabilidad y corresponde a la dirección en la cual los acontecimientos evolucionan hacia una mayor aleatoriedad, ¿cómo pudo el Universo situarse a sí mismo en un estado inicial altamente ordenado? Si el universo, por así decirlo, está perdiendo cuerda, ¿qué pudo dársela? Éste es el tema de que trata el capítulo siguiente.

27. Entropía

La *entropía* tiene una definición técnica, precisa y rigurosa, tanto en la teoría termodinámica como en la teoría de la información. Mas para nuestro propósito será suficiente considerarla –groseramente hablando– como una medida del desorden, de la ausencia de pautas y regularidades. Con este mismo burdo lenguaje, "el contenido de información" de un sistema es una medida de su ordenación. Estas dos medidas varían inversamente. Cuando la entropía de un sistema aumenta, disminuye su contenido de información, y viceversa.

Es fácil poner de manifiesto ambas propiedades ayudándonos de nuestra baraja. Ordenémosla de manera que cartas rojas y negras vayan alternándose, con una carta negra en la parte superior. Por lo que a colores se refiere, tenemos información completa sobre los naipes; sus palos y valores, en cambio, pueden ser aleatorios. Comparemos esta baraja con otra donde sólo sean aleatorios los valores. Por ejemplo, los palos podrían estar dispuestos, de arriba a abajo, en ciclos de picas, corazones, tréboles y diamantes. El segundo mazo tiene una entropía inferior y un contenido de información mayor que el primero.

Barajemos uno cualquiera de estos mazos. Conforme las cartas van siendo mezcladas, se acrecienta la entropía del mazo y desciende correlativamente su contenido de información. (Diremos de paso que barajar las cartas por "peinado" es sorprendentemente ineficaz. Hacen falta muchos peinados para destruir completamente la ordenación de un mazo altamente ordenado.) Cuando los naipes han sido suficientemente barajados, el mazo alcanza un estado de máxima entropía y de mínimo contenido de información, situación que

se corresponde con lo que en termodinámica se denomina estado de equilibrio térmico.

Ludwig Boltzmann, físico austríaco del siglo pasado, fundador de la termodinámica estadística, fue uno de los primeros científicos que especuló con profundidad sobre cómo podrían aplicarse las leyes estadísticas para explicar por qué nuestro universo está tan fuertemente organizado (tiene tan baja entropía). Esta cuestión no había preocupado a anteriores científicos. Galileo, Kepler y Newton hubieran convenido todos ellos en una respuesta sencilla: Dios es un gran matemático, "y el firmamento muestra la obra de sus manos". Boltzmann vivió en una época en la que científicos y filósofos empezaban a concebir la cosmología en términos evolutivos. ¿Es posible, se preguntaba Boltzmann, que el universo fuese inicialmente un vasto y caótico mar de partículas moviéndose al azar? ¿Dictaron las leyes de la entropía que en algún lugar de este mar indiferenciado hubiera de surgir por medios naturales un universo con una estructura tan compleja como el nuestro?

El punto de partida de la osada visión de Boltzmann fue un sistema de moléculas gaseosas moviéndose al azar en el seno de un recipiente cerrado. Hemos de idealizar este modelo, suponiéndolo completamente aislado del resto del mundo. Las moléculas de gas vuelan de acá para allá, chocando y rebotando unas contra otras y contra las paredes. Todos sus movimientos son reversibles en el tiempo. Si pudiéramos tomar una película cinematográfica a nivel molecular de una porción cualquiera del gas, y pasar luego el filme marcha atrás, lo que veríamos sería indistinguible de lo que se vería al pasarlo hacia delante. El gas está en equilibrio térmico, un estado de máxima entropía.

Si en el universo nada existiera, aparte de este recipiente y del gas que contiene, ¿podríamos decir que el sistema posee una flecha temporal? No, decía Boltzmann, no podríamos. Es forzoso que de algún modo intervenga el tiempo, pues no podemos tener concepto de movimiento sin tiempo; pero no hay modo de orientar una flecha temporal, a fin de distinguir una dirección y sentido de la otra. La película muestra lo mismo marcha adelante como marcha atrás. Es un tiempo simétrico, sin dirección ni sentido, sin flecha. En este punto, y para evitar paradojas inevitables, hemos de analizar cuidadosamente el papel del observador.

Supongamos que uno de nosotros, provisto de su propia flecha temporal psicológica, estuviera observando las moléculas del recipiente y gozara de la facultad de ver la conducta de cada molécula

individual. El sistema no carecería ya de flecha temporal, porque ahora le hemos impuesto la nuestra propia. Vemos a cada molécula moverse desde *nuestro* pasado hacia *nuestro* futuro. Si súbitamente cada molécula se detuviera e invirtiera el sentido de su movimiento, inmediatamente lo observaríamos. No diríamos, como es obvio, que el tiempo ha dado marcha atrás. Diríamos que, inexplicablemente, las moléculas habían invertido todas su sentido de movimiento, sin interrupción del flujo regular de progresión hacia adelante de los acontecimientos.

Es evidente que al ser observado el recipiente no es ya un sistema aislado. Está interactuando con uno de nosotros, un complicado sistema molecular dotado de un sentido de progresión del tiempo bien definido. Probemos ahora a imaginar el recipiente como la única cosa existente. No hay observadores, ni siquiera divinos. Tal vez, en algún sentido, siga habiendo allí un tiempo; pero no hay modo de orientarlo, de dotarlo de dirección y sentido. Decir que en tal sistema aconteció una inversión del sentido del tiempo sería tan vacuo como decir que el gas se volvió cabeza abajo o que sufrió una inversión especular.

La situación se asemeja mucho a la que ya vimos en relación con la lateralidad. Las letras OUT pintadas en una puerta de cristal no significan OUT ni TUO a menos que esté presente un observador situado a uno de los lados del cristal. Imaginemos que nada existiera en el Universo excepto OUT, suspendido en el vacío. Tiene lateralidad, pero no hay manera de definir qué clase de lateralidad. Decir que OUT se ha invertido a sí mismo por reflexión especular es no decir nada.

Observemos más de cerca lo que está sucediendo dentro de nuestro idealizado recipiente. Sus moléculas están danzando caóticamente. El estado global es el de máxima entropía. Empero, conforme observamos, vemos que sucede algo tan maravilloso como delicioso. Aquí y allá se están formando pequeños reductos donde la entropía decrece momentáneamente, y después vuelve a aumentar. Al principio observaremos miríadas de estas diminutas y efímeras regiones, donde las moléculas se apretujan más de lo habitual. Si observásemos durante suficiente tiempo veríamos parcelas de orden mayores y más duraderas. Observando durante un tiempo enormemente grande, de billones y billones de años, acabaríamos viendo cualquier motivo o pauta que queramos definir, como por ejemplo la concentración de todas las moléculas en un rincón del recipiente, o que momentáneamente compongan la palabra OUT.

A cada una de estas parcelas donde existe un orden local podemos asignarle una flecha temporal, para indicar si la parcela se dirige hacia un estado de mayor o menor entropía; o más precisamente, para mostrar en qué sentido suponemos que está evolucionando tal parcela. Desgraciadamente, en cada momento dado, es igualmente verosímil que una parcela lo haga tanto en un sentido como en otro. No hay manera de atribuir al tiempo una dirección preferente al considerar el sistema en su totalidad: fluctúa en cada lugar, e incluso su entropía global fluctúa, pero en el conjunto permanece en un estado de equilibrio térmico carente de flecha temporal.

Podemos preparar un precioso modelo de tales fluctuaciones con nuestra baraja. Mezclemos concienzudamente las cartas y extendámoslas después en hilera sobre la mesa, examinando la secuencia de valores que presentan. Las encontraremos llenas de pequeños retazos de orden. Aquí vemos un tramo de cinco cartas rojas; allá, una pareja de sotas; acá, una serie 6-7-8. Somos nosotros, evidentemente, quienes estamos definiendo qué entendemos por pauta o *regularidad*, pero eso no importa. Si decidiéramos que una serie rey-7-10 es una pauta, descubriríamos que tal pauta se presenta ocasionalmente. Barajemos las cartas un poco más. Cualesquiera regularidades que antes hubiéramos encontrado volverán a mezclarse y perderse en el caos global del mazo, formándose a cambio nuevas parcelas de orden. Cuanto más sigamos barajando, tanto más verosímil será encontrar series de regularidades sorprendentemente largas. A la larga, encontraremos cualquier secuencia de naipes que queramos definir, incluidas secuencias donde se especifique la posición de cada carta en el mazo. Además, cualquier secuencia predefinida volvería a presentarse infinitas veces si siguiéramos barajando eternamente. Si ideásemos un sistema cifrado, por ejemplo, dando a cada carta un código de letras, barajando infinitamente el mazo llegarían a leerse las obras completas de Shakespeare, ¡y las podríamos leer infinitas veces!

La magna visión de Boltzmann consistió en un cosmos de formidable tamaño, quién sabe si infinito en el tiempo y en el espacio, compuesto por un sinfín de partículas en equilibrio térmico. ¿No sería inevitable, razonaba Boltzmann, que acá y allá se suscitasen reductos donde la entropía decreciese durante breve tiempo (el "breve" pudieran ser miles de millones de años)? Nuestro Universo, apenas una mota de polvo en el mar infinito del caos, pudiera ser tal vez una de tales regiones. En algún momento del pasado, eones atrás, en algún punto la entropía disminuyó por azar lo suficiente

como para formar el Universo ordenado en que nos encontramos nosotros. El acontecimiento es tan improbable que nos parece un milagro; pero hemos de recordar que puede haber pasado un tiempo infinito (¡signifique esto lo que signifique!) antes de que por fluctuación local nuestro Universo cobrase existencia. Nosotros somos los actores de un drama que ha sido compuesto accidentalmente al barajarse infinitamente los naipes del Cosmos. Estrictamente hablando, no podemos decir que el caótico mar esté moviéndose en ninguna dirección temporal. Todo cuanto podemos decir es que en el seno de nuestra pequeña comedia, de nuestro efímero reducto de baja entropía, el tiempo ha adquirido una flecha. Dado que nuestro Universo está actualmente desdibujándose y desvaneciéndose, retornando al caos térmico, su flecha temporal señala en la dirección de entropía creciente.

No es éste lugar para adentrarse en las embrolladas dificultades y paradojas que se suscitan al elaborar la visión de Boltzmann. Ningún físico la toma hoy en serio, aunque ocasionalmente alguien trata de resucitarla en términos de fluctuaciones cuánticas en el espacio vacío, o de la interpretación de "mundos múltiples" de la mecánica cuántica. Todo funciona muy bien para sistemas ideales y cerrados de moléculas gaseosas, pero el propio Universo es mucho más interesante. Para empezar, si el Universo se comportase como un gas fluctuante en su equilibrio térmico, cabría esperar que al mirar hacia regiones distantes del universo se hallaran porciones de él en mayor desorden que la región que nosotros ocupamos. Y vemos, en cambio, que se encuentran tan bien ordenadas como nuestra propia región.

Empero, no todo está perdido cuando se trata de hallar el modo de preservar la noción central concebida por Boltzmann, a saber, que la entropía es el principal fundamento de la flecha del tiempo macroscópica. La clave de todo es el *Big bang* o "Gran explosión", y cuesta imaginar que a Boltzmann no le hubiera encantado ver, de haber vivido, la abrumadora evidencia en favor de este explosivo origen del universo. Ya no es necesario buscar a tientas explicaciones en la baja entropía, resultado ocasional de las eternas fluctuaciones de partículas moviéndose al azar. ¡La gran explosión nos da hecho el trabajo en unos cuantos minutos!

Todo comienza, evidentemente, en el misterio. ¿Quién puede saber lo que provocó la explosión primigenia, o cuál fue exactamente el material que explosionó? Si Boltzmann viviera, probablemente la atribuiría a un acontecimiento de azar ocurrido en un mar de

quarks, errantes en un estado de máxima entropía. La "sopa" de quarks pudo haber contenido algún tipo de tiempo, o tal vez carezca de sentido hablar de tiempo antes de la explosión. Sea como fuere, un momento más tarde, cuando estaban siendo emitidas hacia el exterior energía y partículas a velocidades inimaginables, la temperatura de la bola de fuego descendió vertiginosamente, la entropía se desplomó súbitamente y nació un universo de hermoso macroorden. Al nacer, le fueron impuestas dos enormes flechas de tiempo: la dirección de la expansión cósmica y la flecha de la entropía.

No son ambas flechas una misma, y me parece inútil discutir cúal es la más fundamental. El Universo debe su gran desplome de entropía a la gran explosión, así que en ese sentido podemos decir que la explosión, y la expansión consiguiente, provocó –y preserva ahora– la flecha de la entropía. En nuestros días está de moda hablar así acerca del Universo. Véase, por ejemplo, el artículo de David Layzer, "The Arrow of Time" (*Scientific American*, diciembre de 1975), en el que hace ver cómo la gran expansión, combinada con la mecánica cuántica y la relación inversa entre entropía e información, producen y mantienen conjuntamente la flecha termodinámica.

Por otra parte, cuesta trabajo imaginar cómo pudo el Universo en expansión empezar su largo camino desde el orden hacia el desorden, a menos que las leyes de probabilidad no antedatasen, en algún insondable sentido, a la gran explosión. Supongo que podría argüirse que las leyes de probabilidad fueron también creadas por la explosión, pero ahora estamos en una región tan metafísica que no podemos proseguir con el problema sin entrar en viejos debates sobre los fundamentos de las matemáticas.

No importa cómo se hable de él; el Universo es una mezcla obviamente rica de movimientos amplios y globales hacia el caos, con pequeñas parcelas donde las cosas suceden al revés. Layzer utiliza la expresión *flecha histórica* para aquellos procesos en que el orden esté creciendo. La formación de materia, que se mueve ordenadamente desde el lugar donde aconteció la gran explosión, fue el primer y colosal ejemplo de suceso que lleva estampada indeleblemente la flecha histórica. Las evoluciones de estrellas y planetas son ejemplos posteriores. Finalmente, al menos en un planeta, la energía irradiada por un sol permitió el surgimiento y la proliferación de vida, la más estructurada y organizada de las cosas que conocemos.

Para comprender la historia de estos islotes donde se acrecienta el orden, que se mueven a contrapelo de la entropía en aumento,

resulta útil introducir lo que Hans Reichenbach, eminente filósofo de la ciencia alemán, llamó "sistemas ramales". Son éstos sistemas cuasi-aislados, en los que la entropía o bien está creciendo, o bien decreciendo rápidamente, muy rápidamente a veces, mientras el universo, como un todo, deriva hacia el caos. P. C. W. Davies, en su valioso librito *Space and Time in the Modern Universe* (1977) describe una jerarquía típica de sistemas ramales. Comienza al echar un cubito de hielo en un vaso de agua caliente. La entropía del agua se eleva inmediatamente. *No* se trata de una fluctuación natural de tipo boltzmaniano. Es un proceso fuertemente asimétrico respecto al tiempo, nacido de nuestra súbita acción de crear un sistema ramal (el cubito y el agua) que no existía antes allí.

Fijémonos ahora en el cubito de hielo, un cristal fuertemente ordenado. Ha llegado a ser lo que es a partir de otro sistema ramal, un refrigerador. El refrigerador parece violar la segunda ley de la termodinámica, pues extrae calor de una región fría y lo traslada a la porción más caldeada de la habitación, lo cual tiene por efecto congelar el agua y formar un cubito de hielo. El refrigerador es capaz de esto porque también él está influido por otro sistema ramal, una bomba de calor. La bomba funciona con energía eléctrica procedente de otro sistema ramal más, un alternador. El alternador, a su vez, se vale de energía procedente, pongamos por caso, de la combustión de petróleo. La energía altamente ordenada que el petróleo encierra nos lleva a millones de antiguos sistemas ramales, los animales y plantas cuyos cuerpos altamente organizados formarían luego el petróleo. Estos seres vivos fueron intrincados sistemas de "negantropía" (entropía negativa), cuyas flechas siguieron la dirección que siguieron porque se nutrieron de la creciente entropía de nuestro altamente ordenado Sol.

La superficie terrestre bulle con millones de sistemas ramales marcados con una flecha de entropía que señala en una u otra dirección. Casi todos ellos funcionan a base de una energía que, en última instancia, procede del Sol. Volcanes y terremotos son una excepción, pero el viento y el movimiento de las aguas son fuentes energéticas dependientes del Sol, porque es el Sol el que mantiene a la atmósfera en perpetuo estado de desequilibrio entrópico. Una ciudad como Londres representa un enorme crecimiento del orden y de la información. Londres no pudo haber evolucionado sino a consecuencia de vastos movimientos hacia el desorden en el mundo exterior a ella. Los millones de sistemas ramales de la ciudad, vivientes y no vivientes, funcionan a base de desequilibrios de entro-

pía producidos por cadenas de sistemas que en última instancia enlazan con el Sol.

Se construye una casa. He aquí un lento crecimiento del orden. Una bomba la reduce a escombros: rápido crecimiento del desorden. Ninguno de estos acontecimientos es una fluctuación boltzmaniana. Ambos son resultado de una fuerte interferencia de agentes exteriores. A la larga, prevalece la segunda ley de la termodinámica. El Cosmos no puede, globalmente, perder entropía. En su seno se hallan estos peculiares reductos donde hay cosas que en lugar de perder cuerda, la recuperan. Pero la inmensa mayoría de los sistemas ramales está consumiendo su cuerda, y ello significa que el Universo, en su conjunto, también lo está.

No debemos dejarnos confundir lingüísticamente por el hecho de que las flechas histórica y de entropía apunten en sentidos contrarios con respecto al orden. Es fácil distinguir entre ambos tipos de movimiento. El viento puede echar abajo un castillo de naipes, pero su soplo no puede hacer que el castillo vuelva a existir. Ninguna flor crece hacia el interior del suelo. El desplome del castillo de naipes es un movimiento hacia el desorden. El crecimiento de la flor es un movimiento hacia el orden. Ambos acontecimientos son unidireccionales. Ambos definen la *misma* dirección de tiempo en el macromundo. En lo sucesivo haremos caso omiso de los dos tipos de movimiento, y emplearemos el término *flecha de entropía* para el flujo uniforme de los macroeventos, que va, dondequiera que intervenga la entropía, desde el pasado hacia el futuro.

Por lo que al Universo se refiere, ¿lleva camino de agotar su "cuerda"? Los cosmólogos no lo saben de cierto, aunque a veces les gusta hablar como si lo supieran. Si el espacio-tiempo es abierto (y no curvado sobre sí mismo, como en el primitivo modelo de Einstein), su expansión continuará eternamente. El Universo alcanzará finalmente un estado inerte, consumido, que sir James Jeans llamó "la muerte térmica", que para él significaba muerte por congelación. Todas las estrellas se convertirán en cenizas, sean enanas negras, estrellas de neutrones o agujeros negros. Su antigua radiación desaparecerá para siempre en la fría nada del espacio exterior.

Si el espacio-tiempo fuera cerrado (lo cual, en este momento, parece poco probable), la expansión acabaría por detenerse, y el Universo entraría en una fase de contracción. Lo que a continuación suceda, y en qué y cómo quedarán afectadas las estrellas, los planetas y la vida, dista de estar claro. Presumiblemente, la entropía global comenzará a decrecer conforme el Cosmos se dirija hacia su

inevitable implosión y tienda a convertirse en un agujero negro. Examinaremos esta cuestión en el capítulo siguiente.

Resumamos. Que nosotros encontremos, en nuestro loco Universo hay al menos cinco flechas temporales. Los físicos ignoran todavía cómo están interrelacionadas. La dirección preferente del tiempo a nivel microcósmico, en ciertas interacciones débiles donde intervienen mesones *K*, es todavía un misterio total. Tal vez carezca de conexión con las flechas macroscópicas, lo mismo que la lateralidad de las partículas no parece tener conexión con la lateralidad de las moléculas, y que la lateralidad de las moléculas no parece influir en la simetría bilateral de un tigre.

En el nivel macrocósmico, las flechas temporales son cuatro. Primero, está la flecha de entropía que hemos estado discutiendo. Segundo, tenemos la flecha definida por acontecimientos que irradian de un centro, al modo de la expansión de las ondas concéntricas del agua en los estanques o de la energía irradiada por una estrella. Estas dos flechas son consecuencia de las leyes de probabilidad –la flecha entrópica de las leyes estadísticas de la termodinámica, la flecha irradiativa de la probabilidad de las condiciones iniciales o de los límites. Tercera, está la expansión del Universo. Cuarta, la flecha psicológica de la consciencia.

¿Será posible invertir el sentido de una o más de estas cinco flechas sin que queden afectadas las restantes? ¿Será posible invertir el de *todas*? En los últimos años ha habido considerable especulación, y no sólo por autores de ciencia ficción y filósofos, sino también por cosmólogos de primera fila, sobre la posibilidad de que existan universos en los que la mayoría, o incluso la totalidad, de las cinco flechas vayan en sentido contrario a las nuestras. Estos mundos de fantasía, donde el tiempo corre marcha atrás, serán investigados en el capítulo siguiente.

28. Mundos crono-retrógados

Hemos visto ya cómo la dirección del tiempo puede estar definida mediante cinco flechas. Dejemos de lado la cuestión de cómo están relacionadas estas flechas unas con otras, y examinemos esta otra: ¿tiene significado hablar de la existencia de otro universo, exactamente igual al nuestro en lo concerniente a todas las leyes fundamentales de la física, mas donde todas las cinco flechas temporales señalen en sentidos opuestos a los de las nuestras?

El teorema CPT hace pensar que tal mundo tendría que estar formado por antimateria. Existen claros indicios de que la antimateria (materia cuyas cargas tienen signo opuesto a los de la materia ordinaria) tiene una lateralidad que es inversa a la de la materia. Como ya hemos aprendido, la violación de la simetría CP comporta la T-asimetría. A los teóricos les resultaría estéticamente gratificante que pudiera existir un universo en el cual C, P y T fueran las tres reverso de las nuestras. A modo de experimento mental, supongamos que una reversión de T al nivel de las partículas subatómicas se combina con la reversión de las otras cuatro flechas temporales. ¿Será posible que en algún lontano lugar, en otro continuo espacio-temporal, exista un universo de antimateria en el cual las estructuras no sólo posean orientación espacial contraria a la nuestra, sino que, en todos los aspectos, vayan también en la otra dirección en el tiempo?

Mundos con flechas temporales opuestas vienen a ser mundos imagen especular uno del otro. Si eliminamos el papel desempeñado por un observador externo, provisto de su propio sentido de izquierda y derecha, todo cuanto entonces podremos decir es que cada mundo es el reverso, por trasposición especular, del otro. Lo mismo vale para mundos temporalmente retrógrados uno de otro. En cada uno de estos universos, los seres inteligentes están viviendo

"hacia adelante" en su tiempo. Decir que el tiempo de uno de los universos corre "hacia atrás" significa tan sólo que en ese universo los sucesos evolucionan en sentido contrario comparados con los sucesos del primero.

Esta noción de dos mundos con flechas temporales contrarias se remonta a Boltzmann. No parece haber en ella nada que sea lógicamente contradictorio, pero sí conduce a muchos estrafalarios resultados. Por ejemplo, no es posible la comunicación en ambos sentidos entre mentes inteligentes en dos mundos en oposición temporal. Para ver por qué, supongamos que entre la persona A de un universo y la persona Z de un mundo en oposición de tiempo se establece algún canal de comunicación. A le envía a Z un mensaje. Z consigue descodificarlo, y envía de vuelta a A una respuesta. Desde el punto de vista de A, Z está internándose en el pasado. Z no puede responder, pues todavía no ha recibido el mensaje. Desde el punto de vista de Z toda respuesta que él pueda dar llegará en el *pasado* de A, ¡antes de que A enviase el mensaje primitivo! Cualquiera que sea el punto de vista, si se admite la posibilidad de respuesta surgen contradicciones lógicas. La situación se asemeja a las paradojas que plantean las historias de ciencia ficción cuando una persona se interna en el pasado y asesina a un niño que resulta ser él mismo.

La lógica, por consiguiente, parece excluir la comunicación. ¿Qué decir de la observación? Es fácil ver un mundo especularmente traspuesto, ¡basta mirar en el espejo! Pero la observación de un mundo opuesto respecto al tiempo plantea dificultades. Para empezar, la luz, en lugar de ser irradiada desde el otro mundo, estaría viajando hacia él. Si la observación ha de depender de la radiación electromagnética, cada mundo sería totalmente invisible desde el otro. Eliminemos todos los obstáculos, y supongamos que algún día llegamos a descubrir un tipo de radiación que pueda ser dirigida hacia un mundo inverso temporal del nuestro, y rebotar de vuelta hacia nosotros sin interferir en ningún modo con la historia del otro mundo. Utilizando esta misteriosa radiación podríamos "observar" lo que está aconteciendo en el otro mundo, pero no podremos utilizarla para ningún tipo de comunicación. Veríamos, es obvio, al otro mundo en retroceso en el tiempo. Ellos, a su vez, podrían utilizar idéntica técnica para vernos retroceder a nosotros.

Aunque nadie tiene la menor idea de cómo pueda ser tal radiación, al admitir su existencia no parecen deducirse contradicciones lógicas. Bastante extrañamente, tal admisión no presupone una

concepción determinista de la historia, esto es, que dado el estado del Universo en un instante cualquiera, el futuro entero del Universo esté unívocamente determinado. Cuando A examina el estado del universo de Z, todo lo que puede observar es cómo ese universo retrograda a estadios anteriores. Análogamente, al sondear Z el estado del universo de A, lo que ve es a ese universo internarse en el pasado. El pasado, como todo el mundo admite, está fijo por toda la eternidad. Dado que ni A ni Z pueden examinar el futuro del otro mundo, ambos futuros permanecen indeterminados. Poder ver el pasado de otro universo no tiene sobre la controversia determinismo-indeterminismo mayor efecto que la contemplación de una película cinematográfica de algún acontecimiento histórico pueda tener sobre la historia humana.

Para idear experimentos mentales encaminados a zanjar la controversia, de nada sirve tampoco suponer la existencia de dioses capaces de observar los dos universos de flechas temporales opuestas desde un espacio-tiempo de dimensión superior. Incluso aunque pudieran ver la historia completa de ambos universos en un cegador instante del hipertiempo, ello no excluiría la posibilidad de que cada universo, al irse desarrollando en su tiempo propio, no tuviera puntos de ramificación que estuvieran indeterminados en el instante de la ramificación. Más aún, es así precisamente como muchos grandes teólogos de todas las religiones han reconciliado las nociones, aparentemente contradictorias, de libre albedrío y predestinación. El antiguo debate entre deterministas e indeterministas no parece quedar afectado por la noción de mundos crono-retrógados.

El físico británico Frank Russell Stannard, al escribir sobre la simetría del eje temporal ("Symmetry of the Time Axis", *Nature*, 13 de agosto de 1966) sugirió (no demasiado en serio) que dos mundos en oposición temporal pudieran estar ocupando un mismo volumen del espacio-tiempo, interpenetrándose, mas sin interactuar ni interferirse en absoluto, como si sobre un mismo tablero se desarrollaran simultáneamente dos partidas de damas, una sobre los cuadros negros y otra sobre los rojos. Stannard bautizó con el nombre de "fáustico" al "otro" mundo, porque, en el poema de Goethe, a Fausto le fue permitido por Mefistófeles retroceder en el tiempo. En la visión de Stannard, el mundo fáustico está todo él a nuestro alrededor, retrocediendo en el tiempo, desconectado para siempre de nosotros y de nuestra observación.

Mi escritor favorito de poemas humorísticos, J. A. Lindon, se inspiró en la visión de Stannard para componer el siguiente poema:

¡NO, ASÍ NO!

Me colé, pues, por el umbral donde se leía DR. STANNARD.
¡Qué caleidoscopio mental! ¡Qué torbellino de ideas!
Todo cuanto sucedía era extravagante y absurdo.
¡Y es que el tiempo *retrocede* en el mundo fáustico!

Vi al Sr. Pedalflaco en bicicleta... ¡marcha atrás!
y colarse (sin riesgo, al parecer) entre el tráfico
que rugía en torno a él, saliendo de casa para ir a almorzar,
mientras el tren que había perdido se acercaba por detrás.

Pude ver a Paco Buendiente desmasticar su jamón,
antes de echarse a descansar de la mañana a la noche.
Su mujer lo desfrió, y dejó listo para vendérselo al tendero,
marcado TRASERO JAMÓN MEJOR EL.

Me incliné reverente en el centenario de la buena Lady Trinquis
–murió la pobre en diciembre pasado, aunque la enterramos
[antes–
Me guiñó un ojo la vieja potadora, chasqueó la lengua, y dijo:
"¡Dentro de otro siglo cataré leche materna!"

Me mostraron la prisión donde Moncho Cascabancos
sufre condena de tiempo retrógrado.
Cuando cumpla los diecisiete años, podrá colgar las ropas
[carcelarias
y será sacado de la cárcel para descometer su delito.

Espié el baño de Lola Popalimpia (¡La lucha con mi otro yo
me dejó vencido, amigos!). Se empapó bien ella de agua
[jabonosa,
que brotaba del desagüe, salió de la bañera,
y en los grifos se vertió agua clara.

Vi un desbombardeo. Los cascotes se reagruparon,
y formaron edificios. La vida emergió entre las ruinas.
A fogonazos, el humo se encerró en las bombas
que volaron zumbando cola arriba, y se alojaron en aviones.
Oí hablar de un des-sabotaje: fábricas inutilizadas.
Las trabas saltaron; las ruedas dentadas quedaron en su sitio.

Y en este punto salí por el portal que decía DR. STANNARD.
Y vi que mi reloj andaba como siempre.

Pero escribí un gran libro sobre el caso. Nadie lo citará jamás,
a pesar de sabérmelo de cabo a rabo.
Comencé por el final, y fui olvidando conforme escribía.
Desescribí el título, ¡y no sé más que usted!

Si la visión de Stannard parece fantástica, fijémonos en la siguiente noción, que se remonta nada menos que a Platón. Supongamos que el Universo, en su expansión, alcanza un punto en que las fuerzas gravitatorias detienen el movimiento de deriva hacia el exterior, y el Universo comienza a contraerse. Tal vez en el límite extremo de la expansión nuestro mundo entre en una singularidad espacio-temporal, esto es, un punto en el que las ecuaciones de la física dejan de ser válidas, para después, justo cuando empieza la contracción, girar media vuelta todas las flechas temporales, y quedar apuntando en sentido contrario. El Universo, en breve, se convertiría en un mundo de antimateria, cronológicamente invertido.

Precisamente éste es el modelo cosmológico propuesto en años recientes por el astrofísico inglés Thomas Gold. Mas veamos cómo lo expresa Platón en su diálogo *El Político*:*

EXTRANJERO:

Escucha: El Universo que ves, unas veces el dios por sí mismo lo guía en su marcha, y lo hace girar acorde, otras, lo abandona, cuando las revoluciones alcanzan la medida de tiempo que le corresponde, y entonces el Universo vuelve por sí mismo en sentido contrario al movimiento circular, por ser viviente y partícipe de la inteligencia recibida de aquel que lo conformó al principio. Y esto de la marcha retrógrada resulta necesariamente innato en él, por el motivo siguiente.

EL JOVEN SÓCRATES:

¿Por cuál?

*Transcripción tomada de *El político*, págs. 23-26, col. "Clásicos Políticos" del Centro de Estudios Constitucionales, Madrid 1981. La Traducción del original griego es de Antonio González Laso.

EXTRANJERO:

El mantenerse perpetuamente en la misma situación e idéntico modo, así como ser siempre el mismo, es cosa que corresponde exclusivamente a los más divinos entre los seres, mientras que la naturaleza corporal no entra en esta jerarquía. En cuanto a aquel que llamamos cielo y mundo, son muchos y felices bienes los que ha recibido de quien lo engendró, mas desde luego, por fuerza ha tenido que participar también del cuerpo. De ahí que le resulte imposible estar totalmente exento de cambio, si bien, según sus medios y en el máximo grado que está a su alcance, se mueve sobre el mismo punto en una marcha idéntica y única; por eso participa de la retrogradación circular, una rotación en retroceso, la mínima variación posible de su propio movimiento. El hacerse girar a sí mismo constantemente es algo apenas realizable para ningún ser, excepción hecha del que conduce a todos los demás mientras se mueven; pero tampoco es ley de éste el mover a los demás ahora en un sentido, ahora en el opuesto. Así, pues, por todas estas razones, no hay que decir del mundo, ni que gira por sí mismo siempre, ni que, en su totalidad y sin cesar, está por obra de un dios girando con dobles y contrarias revoluciones, ni tampoco que dos determinados dioses, con designios entre sí contrarios, lo hacen girar; sino que, según lo expuesto ahora, la única explicación que queda es: Que unas veces va conducido por una extraña y divina causa, recobrando su vida e inmortalidad, restaurada por el creador; y que otras, en cambio, cuando es abandonado, marcha él por sí mismo, pues quedó suelto en ocasión tal, que continúa su marcha con movimiento retrógrado durante muchas miríadas de revoluciones, debido, naturalmente, a que, grandísimo como es y en perfecto equilibrio, va girando sobre un punto de apoyo extremadamente pequeño.

EL JOVEN SÓCRATES

Desde luego, parece muy verosímil todo cuanto acabas de exponer.

EXTRANJERO

Razonemos, pues, y partiendo de lo que queda dicho, vamos a considerar el fenómeno que, según afirmamos, es causante de todas estas maravillas. Y sin duda alguna consiste en esto mismo.

EL JOVEN SÓCRATES

¿En qué?

EXTRANJERO

En que la marcha del Universo se verifica, unas veces, en la dirección en que actualmente gira, otras, en la contraria.

EL JOVEN SÓCRATES

¿Cómo eso?

EXTRANJERO

Este cambio se debe considerar, entre todas las revoluciones que tienen lugar en el ámbito del cielo, como la mayor y más completa.

EL JOVEN SÓCRATES

Así parece al menos.

EXTRANJERO

Y, por lo mismo, es preciso creer que también en tal ocasión tienen lugar los mayores cambios en nosotros, los que habitamos en su interior.

EL JOVEN SÓCRATES

También eso es natural.

EXTRANJERO

Y tratándose de cambios grandes, numerosos y diversos, producidos a la vez, ¿acaso no sabemos que la naturaleza de los seres vivos los soporta difícilmente?

EL JOVEN SÓCRATES

¿Y cómo no?

EXTRANJERO

En consecuencia, ocurren entonces por necesidad las mayores destrucciones de vivientes, y entre ellos, por supuesto, del género humano queda poca cosa; y sobre éstos se precipitan a un tiempo muchos accidentes, sorprendentes y nuevos, pero he aquí el más importante y que acompaña a la retrogradación del Universo, en el momento en que sobreviene la fase contraria a la que actualmente hay establecida.

EL JOVEN SÓCRATES

¿Cúal es?

EXTRANJERO

Cualquiera que fuera la edad en que se hallaba cada uno de los seres vivos, ésta se detuvo primero bruscamente en todos ellos, y todo lo que era mortal cesó de pronto en su marcha hacia el aspecto de un envejecimiento progresivo; y evolucionando después otra vez en sentido contrario, fue entrando en un estado de mayor juventud y lozanía. Y así, en los viejos, los blancos cabellos se volvieron negros, mientras, en aquellos cuya barba apuntaba ya, las mejillas fueron alisándose hasta dejar de nuevo a cada cual en su pasada juventud; en cuanto a los adolescentes, sus cuerpos, suavizándose y haciéndose más pequeños cada día y cada noche que pasaba, volvieron a tomar la figura del niño recién nacido, conformándose con ella lo mismo en el alma que en el cuerpo. A partir de entonces, ya en franca consunción los mortales, acabaron desapareciendo totalmente. Y en el caso de los que sufrían muerte violenta por aquel tiempo, el cuerpo del difunto iba pasando por idénticos cambios hasta que muy pronto, en pocos días, quedaba enteramente destruido sin dejar rastro.

EL JOVEN SÓCRATES

Y la generación, ¿cómo se efectuaba entonces entre los vivientes, extranjero? ¿De qué modo se engendraba entre ellos?

EXTRANJERO

Es evidente, Sócrates, que en la naturaleza de entonces no se realizaba entre ellos la reproducción, sino que la raza nacida de la tierra, que, según se cuenta, existió antaño, era precisamente la que por aquella época volvía a surgir de la tierra, la que recordaban nuestros primeros antepasados. Ellos alcanzaron el tiempo que siguió inmediatamente al primer giro, y nacieron al principio del actual; ellos son, pues, los que nos sirvieron de mensajeros de esas tradiciones que ahora por muchos no son creídas, sin razón, por cierto, porque en mi opinión, es preciso suponer lo siguiente: como consecuencia de la evolución que llevó a los viejos al estado infantil, a su vez, los muertos, que yacían por tierra, iban rehaciéndose de nuevo en ella, y volvían a la vida, siguiendo aquella vuelta, al girar totalmente, en sentido contrario la generación; y nacidos así, por fuerza, de la tierra, conforme a este proceso, tienen por ello su nombre y su tradición todos aquellos a quienes un dios no llevó a otro destino.

EL JOVEN SÓCRATES

Desde luego que esto es consecuencia indudable de lo anterior. Pero dime: el modo de vida que, según tú, existió bajo el poder de Crono, ¿se dio en el giro anterior o en el presente? Pues es claro que con cada uno de estos giros coincide un cambio en la dirección del Sol y de las estrellas.

Imaginando interminablemente repetidos los ciclos que describe el extranjero en el diálogo de Platón, tendremos un modelo de Universo notablemente similar al de Gold, así como a las doctrinas de recurrencia eterna de ciertas religiones orientales. Añadamos algunas conjeturas más. Primera, la noción de que cada agujero negro está asociado con un agujero blanco, del cual mana a borbotones toda la materia y energía engullidas por el agujero negro. Los dos

agujeros están unidos por un "puente Einstein-Rosen", o lo que John Wheeler llama un "agujero de gusano". Tal vez los centros de los quásares, y de esas galaxias tipo quásar conocidas como galaxias de Seyfert, sean tales agujeros blancos. Si así fuere, la definitiva muerte por entropía de nuestro Universo pudiera estar siendo demorada, gracias a la materia que constantemente es reciclada a través de los agujeros blancos y negros. En el definitivo colapso del Universo todo desaparecerá en un inmenso y colosal agujero negro. ¿Vendrá tal acontecimiento seguido de la explosión de un agujero blanco, la "gran explosión" con que comienza el siguiente ciclo? ¿Estamos viviendo en un Universo donde lo que llamamos materia no es más que el residuo de la antimateria del Universo colapsado que nos precedió?

Cada uno de estos ciclos de movimiento retrógrado de este universo oscilante puede ser interpretado de dos modos. Si admitimos la hipótesis determinista, el segundo ciclo podría sencillamente repetir lo que sucedió en el ciclo anterior, si bien en secuencia inversa. Por otra parte, el universo crono-retrógrado, lo mismo que el universo faústico o que cualquier otro mundo tempo-retrógrado situado en algún lugar "exterior", no tiene, en absoluto, por qué ser determinista. Podría retrogradar con historia enteramente distinta. En ausencia de cualquier otro universo con el que pudiera interactuar, los seres inteligentes del universo en "marcha atrás" se encontrarían a sí mismos progresando en el tiempo, de modo perfectamente normal.

No parece haber nada erróneo en la primera interpretación, excepto que parece tedioso y sin sentido que la historia no haga sino repetirse a sí misma en direcciones cronológicas alternantes. Para los dioses vendría a ser como si nosotros leyésemos el *Finnegans Wake* hasta el final; después, leerlo hacia atrás hasta el primer *riverrun*, y luego nuevamente hacia adelante, y continuar repitiendo lo mismo indefinidamente; sería como contemplar una misma película de cine proyectada alternativamente en marcha adelante y en marcha atrás. Pero hay que tener en cuenta que necesitamos observadores exteriores, situados en el hipertiempo, para darle significado a las nociones de "hacia adelante" y "hacia atrás". De no existir tales observadores, podríamos igualmente bien hablar de un *único* ciclo que jamás se repite.

El espectáculo resulta menos tedioso cuando los ciclos no son idénticos en su historia. Nada hay en la visión de Platón, ni en la de Gold, que exija a cada *river-run* la repetición exacta de su historia.

En cada ciclo, los seres inteligentes encontrarían el mundo exactamente como nosotros, moviéndose desde un pasado inmutable hacia un futuro impredictible. El futuro, como tan apasionadamente argumentó William James, podría estar repleto de sorpresas que ni aun los dioses serían capaces de prever. Y, ciertamente, la película les resultaría mucho más interesante si no supieran cómo acababa en cada pase.

Ampliemos todavía más esta visión. La existencia contiene una infinidad de universos, cada uno en expansión y contracción, cada uno con "futuros" genuinos, que no "existen" hasta que acontecen. Las criaturas inteligentes de cada ciclo de cada universo se consideran a sí mismas viviendo en el sentido progresivo del tiempo. Si entre estos mundos no hay ninguna suerte de interacciones, es difícil ver cómo pueden surgir contradicciones lógicas que reduzcan al absurdo semejante visión.

Se suscita ahora un curioso pensamiento. ¿Qué podrá impedir que la radiación correspondiente a la fase expansiva del ciclo prosiga su camino y penetre en el semiciclo contractivo? Davies señala en su libro que Wheeler ha conjeturado que hay un gradual "cambio de marea", cuando el Universo va perdiendo velocidad, hasta detenerse, y comienza a moverse en sentido contrario. Entonces, de ser así, cerca del fin del ciclo de expansión se podría comenzar a ver una porción de esta radiación, retornando hacia nosotros en estado difuso y desdibujado. Si el sentido del tiempo se invirtiera para la fase contractiva, esto sería (como dice Davies) "una búsqueda de microondas electromagnéticas desde el futuro". Se ha realizado al menos un experimento, añade, en búsqueda de tales microondas, pero no logró detectarlas.

Situaciones aún más extrañas se presentan en experimentos mentales, al imaginar que personas o partículas individuales retroceden en el tiempo, mientras el resto del Universo prosigue hacia adelante. Examinaremos algunas de ellas en el capítulo siguiente.

29. Personas y partículas crono-retrógradas

Un coetáneo de Platón, aunque más joven, el historiador griego Teopompo de Quíos, escribió acerca de un fruto que, al ser comido, haría que una persona comenzase a rejuvenecer. No es lo mismo, evidentemente, que la completa inversión del tiempo en la persona, pues ésta todavía piensa, habla y actúa del modo normal.

Se han escrito varias historias de ciencia ficción acerca de individuos que se desarrollaron retrógradamente de este modo, entre ellas, un extravagante cuento, *The Curious Case of Benjamin Button* (El extraño caso de Benjamin Button) de F. Scott Fitzgerald. Benjamin nace en 1860, con todos los atributos de un hombre de setenta años, de pelo blanco y luenga barba. Va "creciendo" a ritmo normal en sentido retrógrado, ingresa en el jardín de infancia a los sesenta y cinco, va normalmente a la escuela, y se casa a los cincuenta. Treinta años más tarde, a la edad de veinte, ingresa en Harvard, en donde se gradúa en 1914, a los dieciséis años. Se incorpora al ejército al comienzo de la I Guerra Mundial, siendo inmediatamente nombrado general de brigada, porque durante la guerra de Cuba, siendo biológicamente más viejo, había sido teniente coronel. Pero cuando se presenta en la base militar es inmediatamente devuelto a casa, pues apenas si es un chiquillo. Continúa haciéndose más joven, hasta no poder ya ni andar ni hablar. "Después, todo fue oscuridad", dice la última frase del cuento, "y su cunita blanca y los rostros entrevistos que se movían por encima de él, y el tibio aroma de la leche, se desvanecieron y esfumaron por completo de su mente".

Aparte su desarrollo progresivo, el protagonista, Button, vive normalmente, en un tiempo que progresa "hacia adelante". Puede verse una mejor descripción de una situación donde la flecha tem-

poral de una persona apunta hacia atrás en una novela de Lewis Carroll, *Sylvie and Bruno Concluded*. El Profesor alemán le entrega al narrador un Reloj Fantástico, dotado de una "manecilla de inversión", cuyo efecto es que el narrador y su entorno vayan retrógradamente en el tiempo durante unas horas. Hay una divertida descripción de una comida crono-retrógrada, en la cual "un tenedor vacío sube hasta los labios: recibe allí un bocado de cordero pulcramente cortado, y rápidamente lo lleva hasta el plato, donde instantáneamente se une a la porción de carne que aún queda en él". La escena no es coherente. El orden de la secuencia de observaciones relativas a la mesa es el retrógrado, pero las palabras son pronunciadas en dirección de tiempo progresivo.

La misma incoherencia se comete en *Happy End*, una película checa en la cual la acción corre hacia atrás, así como las secuencias de comentarios, pero no las fases individuales. Ejemplo:

Esposa: "Qué triste parece este pez".
Amante: "Tú también, querida mía".
Esposa: "Está un tiempo precioso".

La revista *Time* (28 de junio de 1968) concluía su crítica de la película diciendo: "más de hora una es, mismo lo de minutos 73 pero".

Cuando tratamos de imaginar a un individuo aislado cuyas funciones corporales y mentales estén todas cronológicamente invertidas, mientras el resto del mundo continúa como siempre, tropezamos con enormes dificultades. Para empezar, a esa persona le está prohibido revivir en sentido inverso experiencias anteriores de su vida, porque esas experiencias están ligadas a su mundo exterior. Dado que ese mundo continúa avanzando, ninguna de sus experiencias pasadas puede ser duplicada. ¿La veríamos en una loca danza mortal, a modo de autómata cuyo motor marchase hacia atrás? ¿Se encontraría a sí misma, desde su punto de vista personal, pensando todavía en sentido progresivo en un mundo que parecería ir marcha atrás? En tal caso, nuestra persona sería incapaz de ver u oír nada, porque toda la luz y las ondas sonoras del mundo exterior estarían viajando hacia su foco emisor.

Al parecer, no encontramos sino despropósitos y absurdos lógicos cuando tratamos de aplicar a una mente individual una flecha de tiempo invertida. Si embargo, al descender al nivel microcósmico de la mecánica cuántica, ¿será posible hablar coherentemente de

partículas que retrogradan en el tiempo? Lo es. En 1965, Richard P. Feynman, a quien ya citamos en el capítulo 22, recibió, compartido, el premio Nobel de Física por sus revolucionarias aportaciones a la mecánica cuántica. En la "visión espacio-temporal" de Feynman, como es llamada, las antipartículas son tratadas como partículas que retrogradan en el tiempo durante fracciones de microsegundo.

Cuando se produce la creación del par formado por un electrón y su antipartícula, el positrón (electrón de carga positiva) tiene una vida extremadamente efímera. Colisiona inmediatamente con otro electrón; ambos son aniquilados, y se produce la emisión de los rayos gamma. En la teoría de Feynman hay solamente *una* partícula, el electrón (véase la figura 68, izquierda). Lo que observamos como positrón es meramente un electrón que retrograda momentáneamente en el tiempo. Dado que nuestro tiempo, en el cual observamos el acontecimiento, corre uniformemente hacia adelante, vemos al electrón crono-retrógrado como si fuera un positrón. Nosotros creemos que el positrón es aniquilado al chocar con otro electrón, pero tal aniquilación no es más que el punto del tiempo donde el electrón penetró en el pasado. El electrón ejecuta una diminuta danza en zig-zag a través del espacio-tiempo, saltando al pasado durante el tiempo justo, bastante como para que nosotros podamos ver su trayectoria en una cámara de burbujas, e interpretarla como trayectoria de un positrón avanzando en sentido progresivo del tiempo.

Feynman dio con la idea fundamental cuando era estudiante de segundo ciclo en Princeton, gracias a una conversación telefónica con su profesor de física, John A. Wheeler. En el discurso de aceptación del premio Nobel, Feynman relató la historia como sigue:

"Feynman", dijo Wheeler, "ya sé por qué todos los electrones tienen la misma carga y la misma masa".
"¿Por qué?", preguntó Feynman.
"Porque", contestó Wheeler, "¡son todos el *mismo* electrón!"

Wheeler prosiguió por teléfono explicando la estupenda visión que le había sobrevenido. En la teoría de la relatividad, los físicos, para representar los movimientos de los cuerpos a través del espacio-tiempo, se valen de los llamados gráficos de Minkowski. La trayectoria de un objeto sobre uno de estos gráficos es llamada línea del mundo del objeto. Wheeler imaginó un único electrón, danzando alocadamente adelante y atrás en el espacio-tiempo y trazando una

única línea del mundo. La línea del mundo describiría un nudo increíblemente complejo, una especie de monstruoso ovillo de cordel enredado, con billones de billones de cruces consigo mismo, de manera que el "hilo" llenara el Cosmos entero en un instante cegador, sin tiempo. Si tomamos una sección transversal del espacio-tiempo cósmico, cortándolo perpendicularmente al eje del tiempo, obtenemos una imagen del espacio tridimensional en un determinado instante. Esta sección transversal tridimensional se mueve hacia adelante a lo largo del eje de tiempo; es sobre esta sección móvil del "ahora" donde los acontecimientos del mundo ejecutan su danza. Sobre esta sección transversal, la línea del mundo del electrón, ese increíble nudo, quedaría rota en billones de billones de puntos danzantes, correspondientes cada uno a un lugar donde el ovillo trazado por el electrón ha sido seccionado. Si el corte transversal secciona a la línea del mundo en un lugar donde la partícula esté avanzando en tiempo, el lugar es un electrón. Si corta a la línea del mundo en un lugar donde esté yendo hacia atrás en tiempo, el lugar es un positrón. En la fantástica visión de Wheeler, todos los electrones y positrones del mundo son secciones transversas de la enrevesada y anudada trayectoria que en el espacio-tiempo traza esta única partícula. Dado que son todas ellas secciones de la misma línea del mundo, todas ellas tendrán, naturalmente, masas y cantidades de carga idénticas. Sus cargas positiva y negativa no son más que indicaciones del sentido temporal en el que la partícula estaba en ese instante tejiendo su camino a través del espacio-tiempo.

Mas para que esto sea así hay un enorme inconveniente. El número de electrones y positrones del Universo tendría que ser el mismo. Podemos comprenderlo sin más que trazar en una cuartilla una analogía bidimensional de la visión de Wheeler. Sencillamente, tracemos sobre la hoja una única línea, sin levantar el lápiz del papel, formando un enrevesado nudo (figura 68, derecha). Dibujemos a través de ella una línea recta. La recta representa una sección transversal unidimensional, en un instante dado, a través de un mundo bi-espacial (un eje de espacio y un eje de tiempo). En los puntos donde el nudo, al interceptar a la recta, está moviéndose hacia arriba, en el sentido de la flecha temporal, se produce un electrón. Allí donde corte a la recta yendo en sentido contrario, produce un positrón. Es fácil ver que el número de electrones y positrones tiene que ser el mismo, o a lo más, diferir en uno. Por eso, cuando Wheeler le hubo descrito su visión, Feynman inmediatamente le dijo: "Pero, profesor, no hay tantos positrones como electrones." "Bueno",

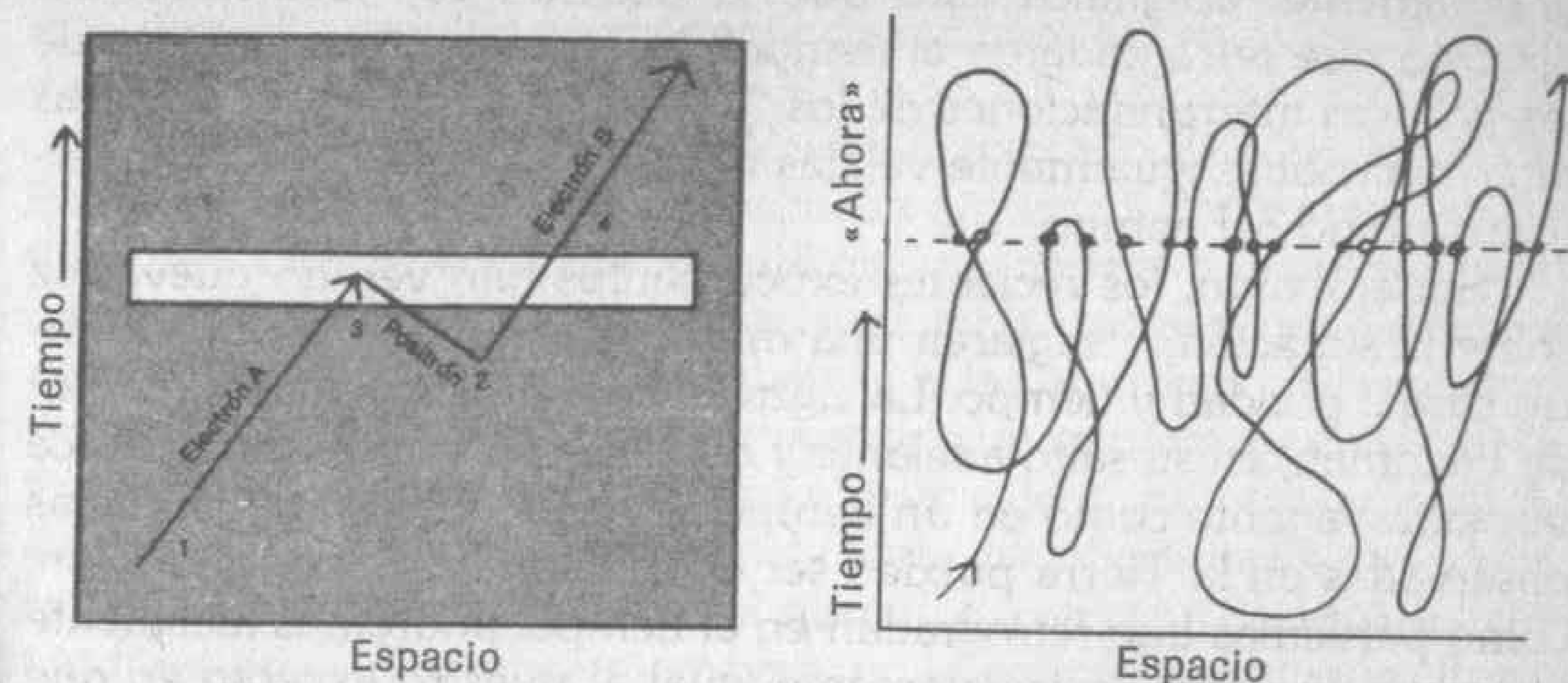


Fig. 68. Gráficas de Feynman. El gráfico de la izquierda, una versión simplificada ideada por Banesh Hoffman, del Queens College, muestra cómo una antiparticula puede ser considerada como una particula que retrograda en el tiempo. La gráfica es observada a través de una ranura horizontal abierta en una hoja de cartulina, que vamos deslizando lentamente hacia arriba, sobre la gráfica. Al mirar por la ranura, vemos los acontecimientos producirse en nuestro "ahora", que "mira" hacia delante. El electrón *A* se mueve hacia la derecha (1), se crea un par electrón-positrón (2), el electrón y el positrón se aniquilan mutuamente (3) y el electrón *B* prosigue hacia la derecha (4). No obstante, si prescindimos de la dimensión temporal (es decir, sin la cartulina ranurada) podemos ver que hay una sola particula: un electrón que va, primero, hacia delante en el tiempo, después hacia atrás y, finalmente, de nuevo hacia delante. La explicación de Feynman nació de una extravagante sugerencia de John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, a saber, que una única particula, al trazar a través del espacio y tiempo una "linea del mundo" (derecha), podría crear todos los electrones *(puntos gruesos negros)* y todos los positrones *(circulitos blancos)* del mundo.

repuso Wheeler, "tal vez estén escondidos en protones, o algo así."

Aunque Wheeler no estuviera proponiendo una teoría seria, la sugerencia de que un positrón pudiera ser interpretado como un electrón que está moviéndose temporalmente en sentido cronológico retrógrado prendió en la imaginación de Feynman, quien halló que tal interpretación podía ser manejada matemáticamente de modo enteramente compatible con la lógica y con todas las leyes de la teoría cuántica. Llegó a convertirse en piedra angular de su famosa "visión espacio-temporal", que logró concluir ocho años más tarde. Aunque la teoría es equivalente a las concepciones tradicionales, la zigzagueante danza de las partículas de Feynman proporcionó un nuevo método para tratar ciertos cálculos y simplificarlos

grandemente. ¿Significa esto que el positrón es "realmente" un electrón que retrograda en el tiempo? No, ésa es solamente una de las posibles interpretaciones de los "gráficos de Feynman"; en otras interpretaciones igualmente válidas no se habla para nada de invertir el sentido del tiempo.

Sin embargo, los recientes experimentos han vertido nueva luz sobre la situación, y sugieren una misteriosa trabazón recíproca entre carga, paridad y tiempo. La zigzagueante danza de las partículas de Feynman, en su salto adelante y atrás en el tiempo, ya no parece tan extravagante como en un tiempo se pensó. Si las antipartículas observadas en la Tierra pueden ser consideradas, sin contradicción, como partículas que retrogradan en el tiempo, podremos fácilmente imaginar un universo exactamente igual al nuestro excepto en que la totalidad de las tres asimetrías –carga, paridad, tiempo– están traspuestas con relación a las de nuestro mundo. Si resultase que la carga es, en algún sentido que todavía se desconoce, una trasposición de tipo izquierda-derecha, entonces el antimundo sería, sencillamente, un mundo que está invertido con respecto al tiempo y el espacio.

En el capítulo 17 recordamos la perplejidad de Kant al observar cómo, en un par de objetos enantiomorfos, aunque idénticos en todos los aspectos, era imposible dar la vuelta a uno de ellos y hacerlo casar con el otro. Vimos también cómo tal dificultad podía resultar menos misteriosa una vez que se comprendía que ambos objetos son idénticos al sumergirlos en un espacio de dimensión mayor, que su diferencia es tan sólo una ilusión, nacida de estar ambos atrapados en el espacio tridimensional, con lateralidad contraria.

Hoy en día, a los físicos no les causa tanta perplejidad el fenómeno de la asimetría espacial a nivel microcósmico como la unicidad del sentido temporal de evolución de ciertos microacontecimientos. La visión de Feynman proporciona una sorprendente vía de salida, que es, sencillamente, una extensión al tiempo del mismo truco del que nos servimos en el capítulo 17 para despejar la perplejidad de Kant. Nuestro mundo y el antimundo podrían ser idénticos en el mismo sentido en que lo son las manos derecha e izquierda; sólo que ahora tenemos que dar con la imaginación dos saltos en lugar de uno: un salto a un espacio de dimensión superior, y un salto a un tiempo también "superior". Nosotros, prisioneros de las tres dimensiones espaciales, más una de tiempo, vemos ambos mundos como imágenes especulares uno de otro, y moviéndose en sentidos cronológicos opuestos. En un espacio de dimensión superior, una hiperpsique podría tener por idénticos a nuestro mundo y a un antimundo.

Ya hemos señalado (en una nota al capítulo 17) que la novela *Ada* de Vladimir Nabokov está situada argumentalmente en un antimundo. En 1974, Nabokov publicó una novela maravillosa, más corta, titulada *Look at the Harlequins!*, en la que son tan esenciales para la trama las cuestiones relativas a las simetrías del espacio y tiempo, que a mí me complace pensar que su libro pudo estar influido por la lectura que Nabokov hiciera de la primera edición de éste. El que yo llamo problema de Ozma está explícitamente descrito por Iris, la primera esposa del narrador, como un "estúpido acertijo filosófico". El narrador, empero, no lo considera estúpido. Por el contrario, padece de una peculiar patología que es el tormento de toda su vida: es incapaz, en su mente, de imaginar cómo volverse sobre sí mismo, de modo que izquierdo se convierta en derecho. He aquí como describe él su dolencia:

"En la vida física, real y concreta, puedo volverme tan sencilla y rápidamente como cualquiera. Pero, mentalmente, con los ojos cerrados y el cuerpo inmóvil, soy incapaz de permutar una dirección y otra. Hay en mi cerebro alguna célula bisagra que no funciona. Puedo, evidentemente, hacer trampa poniendo a un lado una instantánea mental de una vista, y seleccionar después despaciadamente la visión contraria, para mi camino de regreso hasta el punto de partida. Pero si no hago trampas, algún tipo de obstáculo atroz, que me volvería loco si yo perseverara, me impide imaginar la torsión que transforma una dirección en otra directamente opuesta. Estoy aplastado, llevando a cuestas el mundo entero, en el proceso de intentar visualizar cómo me doy la vuelta, y hacerme a mí mismo ver como 'derecha' lo que veía como 'izquierda', y viceversa."

Al final de la novela, el narrador, absorto en sus pensamientos, se cae por un parapeto, en las afueras de Catapult, California. No había sido capaz, al acercarse al borde, de dar media vuelta sobre sí mismo. "Hacer tal movimiento hubiera significado hacer girar el mundo en torno a su eje, y eso era tan imposible como viajar físicamente de vuelta desde el momento actual hasta el precedente."

Este contraste entre la inalterable dirección del tiempo y nuestra libertad para movernos y dar vueltas por el espacio es lo que late en el corazón de la novela de Nabokov. El "mórbido error del narrador es muy sencillo. Ha confundido dirección y duración. Habla

de espacio, pero lo que él quiere expresar es tiempo". Es sólo el pasado, hacia el que no podemos volvernos y regresar. Pertenece a lo que Thomas Wolfe llamó "la fábrica terminada e indestructible... la extraña finalidad del oscuro tiempo". El narrador de Nabokov sobrevive a su accidente, aunque, lo mismo que T. S. Eliot al escribir *Ash Wednesday* (Miércoles de ceniza), "no puede tener la esperanza de regresar".

La capacidad de los físicos para "volver el tiempo" (cito ahora el último párrafo de *Look at the Harlequins!*) recuerda a una de esas pulcras fórmulas que escriben en la pizarra, "hasta que llega el siguiente y borra la tiza". No hay para nosotros forma de escapar a la unidireccionalidad del tiempo, de evitar ese "desplome" final, esa "extinción", por la que somos catapultados por completo fuera del espacio, fuera del tiempo.

30. Epílogo

Tras las atrevidas fantasías de los dos últimos capítulos, ya es hora de retornar a materias más prosaicas, y a tratar de resumir con mayor realismo en qué situación se encuentra la física con respecto a la asimetría espacial y temporal.

Como ya dijera Charles Peirce, los universos no abundan tanto como las zarzamoras. Existimos en el único que conocemos, y verosímilmente, la ciencia apenas si ha comenzado débilmente a penetrar en sus sutiles leyes. Las pocas leyes fundamentales que conocemos tienen un fantástico grado de simetría tanto respecto del espacio como del tiempo.

Experimentos recientes han hecho ver que en el nivel microcósmico, en ciertas interacciones débiles, hay violaciones de las tres grandes simetrías, lateralidad, carga y tiempo. Por qué ocurre así no está claro. Conjeturas hay muchas; lo que no hay son pruebas que respalden a ninguna de ellas.

¿Contiene el Universo galaxias de antimateria? Hasta ahora, los astrofísicos no tienen forma de saberlo. La mayoría, empero, cree que la respuesta ha de ser negativa. En los modelos estándar de la gran explosión, toda la materia del Universo es idéntica a la materia de nuestra galaxia, y evoluciona en igual sentido con respecto a todas las flechas de tiempo.

No existe la más mínima prueba o indicio en favor de la existencia de otro universo donde carga, paridad, tiempo (o dos de ellas, o las tres) estén invertidas respecto de las de nuestro mundo. Más aún, no hay evidencias de que exista *ningún* otro universo.

Sabemos que nuestro Universo está en expansión. Se cree que la cantidad de materia que contiene es insuficiente para provocar el

repliegue del espacio-tiempo sobre sí mismo. Si tal punto de vista fuese cierto, el Universo estaría condenado a expandirse eternamente. Incluso si resultara que el Universo contiene suficiente materia (oculta en lugares donde los astrónomos no han podido hallarla todavía) como para cerrar el espacio-tiempo y dar marcha atrás a la expansión, no hay razones para suponer que tal inversión haya de tener consecuencia alguna sobre la carga, la paridad, o la dirección del tiempo a nivel microcósmico. No hay tampoco indicio alguno de que si el Universo comenzara a contraerse, las macroflechas de la entropía, la radiación y la consciencia tuvieran, servicialmente, que dar media vuelta. Lo más verosímil es que continuara siendo el mismo Universo de siempre, sólo que haciéndose más pequeño en lugar de más grande, y encaminándose hacia un destino singular, acerca del cual hay actualmente no poca controversia.

El problema de Ozma parece resuelto. Como hemos visto, si existe una galaxia donde el sentido del tiempo sea opuesto al nuestro, no podremos comunicarnos con nadie en ella. Si hay alguna forma de establecer comunicación, ellos y nosotros podremos llevar a cabo experimentos que nos proporcionen la común comprensión de las nociones de izquierda y derecha.

No es preciso que pinturas o esculturas sean simétricas para ser bellas. ¿Por qué habría de parecer el universo menos hermoso si estuviera sesgado de diversos modos? Los científicos que se sienten ofendidos por tales violaciones de la simetría no tienen verdadera necesidad de un anti-mundo para restablecer su satisfacción estética. Y ciertamente, no necesitan suponer que nuestro mundo haya de convertirse en un antimundo si comenzara a contraerse.

Ya en el capítulo 24 se consideró brevemente una forma mucho más sencilla de lograr tal satisfacción estética. Justamente antes de la gran explosión, muy bien pudo ocurrir que todo hubiera sido perfectamente simétrico con respecto a la paridad y la carga; e incluso también al tiempo. Al producirse la gran explosión, las leyes de probabilidad pudieron introducir fuertes desviaciones respecto de tal simetría. Ya hemos mostrado cómo la lateralidad de las moléculas vivientes tal vez sea un hecho accidental que con igual facilidad pudo haber acontecido en sentido contrario en los mares primitivos de la Tierra. Otro tanto vale para los sesgos asimétricos de la materia. En el nivel microcósmico basta, para restaurar la simetría, suponer que en los primeros microsegundos de la historia del Universo las cosas pudieron con igual facilidad haber sucedido al revés. Una estatua de Miguel Ángel es asimétrica. ¿Por qué habría de desalentarnos el

que no exista su modelo simétrico? Sabemos que Miguel Ángel pudo haber modelado su estatua orientándola del otro lado, y podemos incluso saber qué aspecto hubiera tenido: basta contemplar la estatua por reflexión en un espejo.

Un redondo bol de sopa tiene elevado grado de simetría radial. Otro tanto ocurre a una pequeña bolita de corcho. ¿Qué sucede al dejar caer la bolita en el centro exacto de la sopa? Aunque las fuerzas actuantes en el líquido son simétricas, y a pesar de que las leyes de probabilidad no tienen preferencia por ninguna dirección, la bolita de corcho no permanecerá en el centro. Su posición allí es inestable. La bola irá flotando hasta el borde de la taza, y la preciosa simetría radial del sistema quedará destruida. De modo análogo, la más leve fluctuación estadística de la hipotética y simétrica sopa de quarks, al convertirse por explosión en nuestro Cosmos, pudo haber creado un desequilibrio que produjo materia en lugar de antimateria. Hemos vuelto al antiguo símbolo Yin-Yang. Es asimétrico, pero podemos dibujarlo de cualquiera de ambos modos.

Desde este punto de vista, la materia que sobrevivió a la bola de fuego primigenia adquirió por azar su actual torsión espacial, su carga y la flecha temporal que ahora observamos en las interacciones débiles. Podemos sin dificultad concebir un Universo en el cual estas simetrías vayan todas en el otro sentido. No podemos concebir un Universo, nacido de una gran explosión, desprovisto de un macrotiempo unidireccional.

Viene ahora una noción más sutil. En ausencia de cualquier otro universo que nos sirva de referencia, y dejando de lado la cuestión de si nuestro Universo está siendo observado por hiperseres, hablar de un universo CPT-invertido tiene tan poco sentido como hablar de un universo vuelto cabeza abajo. Incluso imaginando que nuestro Cosmos fuese observado por seres de un espacio-tiempo superior, una inversión CPT carecería igualmente de significado. Puede compararse al hecho de darle la vuelta a una letra R recortada en cartulina. Un hiperser rodearía en el espacio y el tiempo nuestro Universo, y podría observarla desde otros puntos de vista.

Una de las grandes lecciones que enseña la historia de la ciencia es la humildad. Es muy posible que la ciencia esté aprendiendo continuamente más y más acerca de la estructura del mundo, pero sin duda, lo que se tiene por conocido es superlativamente poco frente a lo que se desconoce. No hay en la actualidad una teoría científica, ni una ley siquiera, que no pueda ser modificada o desechada mañana. "Los grandes principios invariantes de la naturaleza"*, escribía

Phillip Morrison en "The Overthrow or Parity" ("El derrocamiento de la paridad") en *Scientific American* de abril de 1957, "son de fiar en el seno de sus dominios de aplicación, pero no son *a priori* ni autoevidentes, ni de forzosa aplicación universal. Vale la pena verificar con precisión cada vez mayor los grandes principios fundamentales... Hemos entrado en tiempos estimulantes".

Uno de los más estimulantes proyectos del momento, que algunos físicos creen que está ya casi a punto, es la construcción de una profunda teoría de partículas que explique, por medios matemáticamente elegantes, por qué todas las partículas son lo que son. Abraham Pais, escribiendo sobre partículas ("Particles", en *Physics Today*, mayo de 1968), describía el estado de la física de partículas como "no muy distinto al de una sala de conciertos un poco antes del comienzo de la interpretación. Podemos ver en el escenario algunos músicos, aunque todavía no a todos. Están afinando sus instrumentos. En algunos instrumentos podemos oír breves y brillantes pasajes; en otros lugares, improvisaciones; tampoco faltan notas mal dadas. Hay en el ambiente un claro sentido de anticipación del comienzo de la sinfonía".

Si pudiéramos escuchar ahora unos cuantos compases de esta grande y nueva sinfonía, la música bien podría sonarnos como un despropósito. En un artículo que ya citamos en el capítulo 22 ("Innovation in Physics", por Freeman Dyson, en *Scientific American*, septiembre de 1958) recordaba, que en 1958, Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli propusieron una heterodoxa teoría que permitía explicar las violaciones de paridad en las interacciones débiles. Estaba Pauli dando una conferencia acerca de estas nuevas ideas a un grupo de científicos, entre los que se encontraba Niels Bohr. En la discusión que siguió a la exposición, los científicos, más jóvenes se mostraron tajantemente críticos con Pauli.

Bohr se alzó para hablar. "Todos estamos de acuerdo", le dijo a Pauli, "en que su teoría es descabellada. La cuestión que nos divide está en si la teoría es lo bastante descabellada como para tener probabilidad de ser correcta. Mi propia impresión es que no lo es".

Dyson comentaba en su artículo:

"La objeción de que no son suficientemente absurdos es aplicable a todos los intentos hasta ahora efectuados de lanzar una teoría radicalmente nueva de partículas elementales. El aviso va especialmente dirigido a los chiflados. La mayoría de los artículos descabellados que se presentan a la *Physics Review* son rechazados, no porque sea imposible entenderlos, sino porque sí lo son. Por lo común, los trabajos imposibles de entender son publicados. Cuando aparezca la gran idea innovadora, es casi seguro que lo hará en forma incompleta, confusa y enlodada. Su propio descubridor no lo comprenderá sino a medias; a los demás les resultará un profundo misterio. No hay esperanza para las especulaciones que a primera vista no parezcan descabelladas."

Y a las sabias palabras de Dyson me gustaría añadir (aunque yo no puedo afirmar que soy científico): Una vez que la descabellada teoría (quizás una de las muchas teorías sobre supersimetría que se proponen en la actualidad) haya sido afinada, y pase de parecer absurda a resultar sencilla y casi inevitable, después de que el aparente desorden de las moléculas haya dado paso a un hermoso orden, el propio éxito de la teoría abrirá puertas que nos llevarán a un nivel más profundo, de teorías aún más descabelladas.

No pertenezco yo a esa inconcebible escuela de pensamiento convencida de que algún día la ciencia llegará a descubrirlo todo. Semejante opinión me choca siempre por su estólida arrogancia, y me deja sin saber qué decir o qué hacer para conversar con quienes la mantienen. Parafraseando una conocida metáfora de William James, sin duda hay cuestiones relativas a la existencia tan fuera del alcance de nuestra mente como lo está la ciudad de Dublín para un pez que nade por el río Liffey.

"Un hombre es una pequeñez", hace notar el rey Karnos en el drama de Lord Dunsany *The Laughter of the Gods*, "y la noche es muy larga y llena de maravillas".

Notas

Capítulo 1

1. En una reciente investigación llevada a cabo por Gordon G. Gallup, Jr. (de la que dio cuenta en *American Psychologist,* mayo de 1977), se utilizaron espejos para demostrar que los chimpancés y los orangutanes tienen una conciencia de sí mismos de la que carecen los mamíferos no pertenecientes a la familia de los grandes monos. Los chimpancés aprenden rápidamente que la imagen que ven en el espejo no es otro chimpancé. Se valen del espejo para acicalarse partes del cuerpo que no alcanzan a ver, para limpiarse los dientes de restos de comida, etc. Si se anestesia a un chimpancé y se le pinta una mancha alrededor de la oreja, con un tinte inodoro y no irritante, al despertarse el chimpancé no percibe la mancha hasta que la ve en un espejo. Tan pronto la ve, intenta borrársela, frotándola. Los monos a los que se ha enseñado a hablar por señas hacen signos aludiendo a sí mismos cuando se les pregunta a quién ven en el espejo. Parece claro que los grandes monos poseen cierto grado de conciencia de sí mismos, al igual que poseen otros rasgos humanos.

Capítulo 3

1. Después de aparecer la primera edición de este libro, han llegado a mis manos tres artículos de carácter académico, que tratan todos de por qué los espejos invierten la posición derecha e izquierda, pero no la de arriba y abajo. Jonathan Bennett, en "The Difference Between Right and Left" *(American Philosophical Quarterly,* vol. 7, julio de 1970), dice que mi explicación "es la única descripción clara" que conoce. N. J. Block, en "Why Do Mirrors Reverse Right/Left but Not Up/Down?" *(Journal of Philo-*

sophy, vol. 71, 16 de mayo de 1974; el propio título está impreso como reflejado en un espejo), opina que Bennett y yo estamos los dos equivocados. Block distingue cuatro significados distintos de "inversión", y arguye que, efectivamente, en dos de ellos los espejos transponen derecha e izquierda, pero no arriba y abajo. Don Locke, en "Through the Looking Glass" *(Philosophical Review,* vol. 86, enero de 1977), sostiene que yo estoy totalmente equivocado, y que Block tiene razón sólo a medias. El artículo de Locke es, con mucho, el más divertido de los tres, aunque parece estar hablando completamente en serio.

A los matemáticos les parece divertido que los filósofos sigan todavía debatiendo este viejo problema. Lo mismo que en el clásico acertijo de si es el cazador quien "da vueltas" en torno a la ardilla (véase la segunda conferencia de *Pragmatism,* de William James), la verdadera situación es tan sencilla y fácil de entender que se requiere una mentalidad harto peculiar para suponer que la cuestión del espejo no sea una trivialidad. Evidentemente, la única causa de tal confusión es que la situación puede explicarse de diversos modos, utilizando palabras y frases cuyo significado es distinto. Dado que los desacuerdos son de naturaleza puramente lingüística, la única forma de eliminarlos es llegar a un acuerdo para que el lenguaje a utilizar origine el mínimo de confusión. Claro que ahora se suscita la cuestión de: "menos confusión ¿a quién?". ¿A los matemáticos, a los taberneros, a los filósofos? Casi toda la confusión emana de que, en el lenguaje ordinario, la inversión de derecha e izquierda se define por referencia a nuestra simetría bilateral. Tal confusión desaparece al utilizar el lenguaje, más preciso, de la geometría analítica del espacio de dimensión 3, donde no hay distinción entre las coordenadas, excepto en que se llaman *x, y,* y *z.*

Capítulo 4

1. Después de haber escrito este capítulo, Richard Welling, un diseñador gráfico de Hartford, Connecticut, me envió una prueba de imprenta de un anuncio en la que se ve un libro de cocina editado por General Foods Kitchens. Casi en el centro de la cubierta del libro, impresa en grandes caracteres, se lee la palabra COOKBOOK (libro de cocina). Inadvertidamente, la lámina fue invertida y vuelta del revés, pero debido al eje de simetría horizontal de la palabra COOKBOOK, nadie se percató del error. Por fortuna, el Sr. Welling cazó el gazapo antes de que el anuncio fuera impreso.

2. Un truco parecido consiste en rotular las dos primeras palabras de DIÓXIDO DE CARBONO de un color, y la tercera, de otro. Cuando se colocan al revés frente a un espejo, la reflexión invierte una de las palabras, pero no las otras.

3. Dos palabras aún más largas con las que puede realizarse el mismo truco son AUTÓMATA ELECTRÓNICO.

Capítulo 5

1.

THE END

Professor Jones had been working on time theory for many years.

"And I have found the key equation", he told his daughter one day. "Time is a field. This machine I have made can manipulate, even reverse, that field".

Pushing a button as he spoke, he said, "This should make time run backward run time make should this", said he, spoke he as button a pushing.

"Field that, reverse even, manipulate can made have I machine this. Field a is time." Day one daughter his told he, "Equation key the found have I and".

Years many for theory time on working been had Jones Professor.

END THE

Capítulo 6

1. La teoría del Universo estacionario no es ya viable. Cayó en descrédito en 1965, al descubrirse que el Universo está todo él impregnado por una radiación de microondas, que sólo es posible explicar suponiendo que fue producida por la primitiva explosión que creó el Cosmos.

Capítulo 7

1. Hay cierto número de divertidas excepciones a este hecho, tanto en la mitología antigua como en las obras modernas de carácter fantástico. La *amphisbaena* (que en griego significa "va en los dos sentidos") era una fabulosa serpiente que tenía una cabeza en cada extremo del cuerpo, y podía reptar en ambos sentidos. Así la describía Pope en *Dunciad:*

Y así la Amphisbaena (lo he leído)
Por los dos extremos ataca;
Nadie sabe cuál de ellos dirige,
ni cuál es dirigido,
pues no son sino colas ambas cabezas.

Entre las recientes obras fantásticas para niños, aparece Duo, un perro bicéfalo, en *John Dough and the Cherub*, de L. Frank Baum, y en la serie sobre el Dr. Dolittle, de Hugh Lofting, encontramos el Pushmi-Pullyu. Ambos animales tienen una cabeza en cada extremo del cuerpo.

2. Aunque no se sabe de ningún animal que se valga de una rueda para impulsarse a sí mismo, sea por tierra o por aire, sí hay bacterias que para desplazarse en los líquidos hacen girar sus flagelos a modo de hélice. (Véase "*How Bacteria Swim*", de Howard C. Berg, en *Scientific American*, agosto de 1975, pág. 36 y sigs.) Tal vez en el seno de las células haya dispositivos giratorios para desenrollar los retorcidos filamentos de ADN. (Véase *Scientific American*, febrero de 1967, pág. 37.) Ciertos animales unicelulares se dan impulso a sí mismos en el agua haciendo girar todo su cuerpo. No debemos olvidar tampoco al escarabajo pelotero, el escarabajo sagrado de Egipto, que transporta pequeñas bolitas de excremento haciéndolas rodar por el suelo.

3. No es imposible que puedan existir culturas avanzadas de seres extraterrestres inteligentes en las que el gusto y el olfato no sólo sean los sentidos dominantes, sino que proporcionen además los medios primarios de comunicación entre los individuos. Hace pocos años, los biólogos descubrieron la eficaz transmisión de muchas informaciones entre animales terrestres mediante una transferencia directa de sustancias llamadas feromonas. Véase el informe de Edward O. Wilson sobre "Pheromones" en *Scientific American* de mayo de 1963, que ciertamente "despeja la nariz".

Capítulo 9

1. La lateralidad opuesta de los gemelos siameses interviene, aunque de modo secundario, en una desconcertante serie de claves sobre derecha e izquierda, en la novela de Ellery Queen, *Siamese Twin Mystery* (Frederick A. Stokes, 1933).

Capítulo 10

1. En muchas grandes ciudades del mundo existen tiendas para zurdos. La Aristera Organization (9 Rice's Lane, Westport, Connecticut 06880) imprime catálogos de una amplia variedad de objetos para zurdos, entre ellos naipes, cucharones de sopa, reglas, guitarras, relojes de pulsera, carretes de pesca, planchas con el cordón en la posición adecuada, y libretas con la espiral a la derecha. The Left Hand, Inc., en Manhattan, en 140 West 22nd Street, New York, N.Y. 10011, dispone de artículos parecidos.

2. En una novela fantástica de Ray Bradbury, *Something Wicked This Way Comes*, hay un carrusel que hace que los pasajeros se remonten en el tiempo, hacia el pasado, cuando gira en sentido contrario al habitual.

Capítulo 13

1. Cuando un organismo muere, las moléculas de algunos de sus aminoácidos comienzan a "cambiar de mano" a ritmo muy lento, aunque claramente regular. Tras muchos millones de años, estos aminoácidos llegarían a hacerse todos racémicos, y contener un número igual de moléculas "a izquierdas" y "a derechas". Tal proceso de "racemización" proporciona actualmente un método para la datación de objetos antiguos, que tal vez llegue algún día a ser más preciso que el conocido método del carbono 14, que se funda en la cantidad de descomposición radiactiva. Dado que el proceso de racemización se ve afectado por la humedad y la temperatura, su margen de error es considerable; tiene en cambio la ventaja de ser aplicable a objetos de más de 40.000 años, límite de datación por el método del carbono.

2. Sobre la detección de olores por el olfato hay varias teorías. La teoría estereoquímica afirma que es la forma global de las moléculas la determinante de su aroma, y no sus niveles de energía vibratoria. Tal hipótesis está fuertemente respaldada por el hecho de que sustancias idénticas químicamente, excepto por su quiralidad, tienen por lo común aromas diferentes.

La versión "a derechas" de un cierto compuesto huele, por ejemplo, como la menta verde, mientras que su variante "a izquierdas" recuerda la alcaravea. Recientemente se ha descubierto que la diferencia de los aromas de limones y naranjas se debe a diferencias entre las formas de una y otra mano del limonero.

Capítulo 15

1. Dichas cartas son todavía dignas de ser leídas y de ningún modo pueden considerarse anticuadas. Tienen especial interés las cartas de las siguientes personas, publicadas en la revista *Nature* en 1898: Giorgio Errera, 27 de octubre; Karl Pearson, 22 de septiembre; George F. FitzGerald, Clement O. Bartrum, 6 de octubre; Herbert Spencer, 20 de octubre; Herbert Spencer, Karl Pearson, Percy F. Frankland, 10 de noviembre. Aparecieron más cartas en el número de 17 de noviembre. La refutación final de Japp se publicó el 1 de diciembre.

2. Tomado del libro de Eddington, *New Pathways in Science* (Cambridge, 1935), cap. 3. Eddington no cita la fuente de estos versos, y se sospecha que los escribió él mismo.

3. Para la exposición que el propio Miller hizo de su experimento, véase "A Production of Amino-acids under Possible Primitive Earth Conditions", *Science*, Vol. 117, 1953; pág. 528 y sigs.

Capítulo 17

1. Véase el artículo de Peter Remnant titulado "*Incongruent Counterparts and Absolute Space*", donde se analiza el experimento conceptual de Kant, y cuyas conclusiones son, en esencia, idénticas a las aquí expuestas. Pueden verse versiones inglesas de los primeros artículos de Kant sobre el espacio en *Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space*, traducidos por John Handyside (Open Court, 1929). El experimento conceptual es analizado por Norman Kemp Smith en el capítulo titulado "The Paradox of Incongruous Counterparts", en el libro *A Commentary on ant's Critique of Pure Reason* (Macmillan and Co., Ltd., 1918, págs. 161-166), y en un comentario anterior, en alemán, de Hans Vaihinger, publicado en la misma obra (vol. 2, pág. 518 y sigs.).

2. Estos dos versos pertenecen al Canto 2 de *Pale Fire*, precioso poema de Vladimir Nobokov, que es el corazón de su notable novela del mismo título. El poema está presuntamente escrito por un poeta inventado por Nabokov, John Francis Shade. Como una broma, en la primera edición de este libro atribuí los versos únicamente a Shade, y mencioné sólo el nombre de Shade en el índice. Nabokov devolvió la broma en su novela *Ada* (nótese el palíndrome), cuya acción transcurre en Anti-Terra, una especie de imagen especular de nuestra Tierra. En la página 542, Nabokov repite estos dos mismos versos, y añade que fueron escritos por un "poeta contemporáneo, tal como cita un filósofo inventado ('Martin Gardiner') en *Izquierda y derecha en el Cosmos*...".

3. Hay dos cuentos recientes, muy amenos, acerca de un hombre vuelto del revés en un espacio tetradimensional (científicamente más al día que el relato pionero de Wells): "Technical Error", de Arthur C. Clarke (dentro de su obra *Reach for Tomorrow*, Ballantine, 1956), y "The Heart on the Other Side", de George Gamow (en *The Expert Dreamers*, Frederick Pohl, ed., Doubleday, 1962).

4. El libro de Zöllner, publicado primitivamente en Alemania, fue posteriormente traducido al inglés y reimpreso en muchas ediciones. Sir Arthur Conan Doyle dedica un capítulo a defender a Slade en su *History of Spiritualism* (George H. Doran, 1926). Puede verse un buen análisis de las trampas y trucos de Slade en la sección 2 de los *Proceedings of the American Society for Psychical Research, Inc.*, vol. 15, 1921, en un artículo de Walter F. Prince en *"A Survey of American Slate-Writing Mediumship"*. Para saber más sobre este notorio farsante, consúltese a John Mulholland *(Beware Familiar Spirits*, Scribners, 1938*)* y Harry Houdini *(A Magician Among the Spirits*, Harper, 1924*)*.

5. En realidad no son dos tiras, sino tan sólo una. Para conocer algunas de las desconcertantes propiedades de esta doble banda de Moebius, véase el capítulo 7 de mi *Scientific American Bookos Mathematical Puzzles and Diversions* (Simon and Schuster, 1959), del que hay traducción española *(Juegos Matemáticos*, Editorial Revista de Occidente*)*.

Capítulo 18

1. No sé quién fue el primero en presentar explícitamente este problema como un problema de comunicación. Desde luego, está implícito en la discusión de Kant sobre derecha e izquierda, y muchos filósofos posteriores lo citan. Veamos cómo lo plantea William James en el capítulo sobre "La percepción del espacio" de su libro *Principles of Psychology*, 1890.

"Si tomamos un cubo y llamamos a una cara *arriba*, a otra *abajo*, a una tercera *frente* y a la cuarta *espalda*, no queda una expresión por la que podamos describir a otra persona cuál de las restantes caras es la *derecha* y cuál la *izquierda*. Únicamente podemos señalar y decir ésta es la derecha y aquélla la izquierda, del mismo modo que diríamos *esto* es rojo y *aquello* es azul."

Probablemente la manera en que James expone el problema está basada en una exposición semejante de Charles Howard Hinton en la primera serie de sus *Scientific Romances* (George Allen & Unwin, 1888). Hinton (al

que citaremos de nuevo más adelante) creía que él había aprendido a pensar en imágenes de cuatro dimensiones construyendo cubos coloreados en formas diversas. Cuando se refiere a estos cubos (pág. 234), hace una clara exposición de lo que yo llamo el problema de Ozma.

Capítulo 19

1. "Incluso el conocimiento instintivo de tan grande fuerza lógica como el principio de simetría empleado por Arquímedes, puede inducirnos a error. Muchos de mis lectores acaso recuerden el choque intelectual que experimentaron cuando oyeron por primera vez que una aguja magnética imantada colocada en el meridiano magnético es desviada en una dirección determinada, apartándose del meridiano, por un alambre que conduce una corriente, siendo transportada hacia delante en dirección paralela sobre aquél. Lo instintivo es tan falible como la conciencia distintiva. No vale más que para esferas que nos son muy familiares" (Ernst Mach, *Science of Mechanics*).

2. De *War is Kind and Other Lines* (Knopf, 1899), de Stephen Crane.

3. Nos referimos aquí a imanes monopolares, y no a los "monopolos magnéticos", que podrán o no existir. En 1931, P. A. M. Dirac conjeturó la existencia de una partícula elemental, portadora de un "cuanto" de carga magnética, bien sur, bien norte. Dirac las denominó "monopolos". De existir, las ecuaciones del electromagnetismo adquirirían una preciosa simetría. Exactamente igual que una unidad de carga eléctrica en movimiento (como la que tiene un electrón) crea un campo magnético, así una unidad de carga magnética en movimiento crearía un campo eléctrico. Lo mismo que las cargas eléctricas, los monopolos tan sólo podrían ser creados por pares, de signos opuestos. Si dos monopolos de distinto signo llegaran a encontrarse, se aniquilarían mutuamente.

En la teoría de Dirac, la carga de un monopolo tiene que ser múltiplo entero de 68,5, o sea, de la mitad de 137, que es el valor de la recíproca de la misteriosa constante de estructura fina.

En las grandes teorías unificadas de hoy, en las que pretenden unir las fuerzas fundamentales, se supone la existencia de monopolos magnéticos. En 1975 se atrapó uno de ellos, lo cual provocó una conmoción, pero lo que se había atrapado resultó ser otra cosa. En 1981 Blas Cabrera, en la Universidad de Stanford, observó, al parecer, un monopolo magnético, pero los datos no son concluyentes. Véase "The Hunting of the Monopole" (La caza del monopolo) de Bruce Schechter, en *Discover,* julio de 1982, y la reseña sobre la detección de un monopolo por Blas Cabrera el 14 de febrero de 1982 (*Investigación y Ciencia,* edición en español de *Scientific American,* septiembre de 1982; págs. 41-42).

Capítulo 20

1. En 1963, Wigner recibió el premio Nobel de Física, compartido, por sus trabajos pioneros sobre los principios de simetría que subyacen en las interacciones entre partículas. Para los profanos es más conocido por haber sido uno de los firmantes de la famosa carta de Einstein al presidente Roosevelt informándole de la posibilidad de la bomba atómica, y por haber hecho aparecer súbitamente una botella de vino de Chianti para celebrar, en 1942, que Fermi y sus colaboradores habían logrado la primera reacción en cadena autosostenida.

En cierta ocasión tuve el placer de poder preguntar a Wigner cómo había logrado realizar tan sorprendente malabarismo. Me contestó preguntándome si conocía un cuento de Poe, "The Purloined Letter". Lo mismo que en el cuento, el método de ocultación de Wigner consistió en poner la botella en un lugar tan vulgar y evidente, que nadie habría de fijarse en ella. Wigner había llevado la botella hasta el lugar envuelta en una bolsa corriente de papel, que se limitó a dejar a un lado hasta el momento oportuno.

Capítulo 21

1. Fue también en Cambridge, en el último decenio del siglo pasado, donde James J. Thompson descubrió el electrón. La existencia del protón fue establecida firmemente unos quince años después por Ernest Rutherford (más tarde Lord Rutherford), a la sazón en la Universidad de Manchester.

2. La disposición de las piezas del rompecabezas de piezas deslizantes de Sam Loyd pertenece siempre a una de las dos clases, mutuamente excluyentes, de paridad opuesta. En el juego se conserva la paridad, en el sentido de que una vez inicialmente situados los cuadrados en el marco, sólo se pueden obtener, al irlos moviendo, configuraciones de la misma paridad. Puede verse una breve exposición sobre la teoría del rompecabezas y su relación con los números pares e impares en mi *Scientific American Book of Mathematical Puzzles and Diversions* (Simon and Schuster, 1959), págs. 86-89 (Ed. española: *Juegos matemáticos,* Editorial Revista de Occidente.)

3. La idea de que las partículas de materia sean como burbujas de la nada en un mar de partículas es anterior a la teoría de Dirac. Fue utilizada ya por el físico irlandés Osborne Reynolds en su teoría granular del Universo (véase su *On an Inversion of Ideas as to the Structure of the Universe,* 1902, y *The Sub-Mechanics of the Universe,* 1903, publicadas ambas por Cambridge University Press). La misma noción se halla implícita en la teoría del "chorro de éter", debida al científico inglés Karl Pearson, en la cual las partículas son consideradas como puntos que reciben chorros de éter proyectados desde el espacio de cuatro dimensiones al de tres. (Véase *The American Journal of Mathematics,* vol. 13, 1891, págs. 309-362.)

4. Emilio Gino Segrè y Owen Chamberlain recibieron en 1959 el premio Nobel de Física por su trabajo en esta primera demostración de la existencia del antiprotón.

5. Se ha podido observar el antiprotón, que sería el núcleo del antihidrógeno; pero no con un positrón y girando en órbita estable en torno a él, lo que daría un átomo de antihidrógeno. El núcleo de antideuterio (véase el capítulo 19), también llamado hidrógeno pesado, ha sido igualmente observado. Los físicos rusos han comunicado que han observado el núcleo de antitritio (el tritio es otro isótopo del hidrógeno), y el núcleo de un isótopo del antihelio. Empero, no ha podido observarse todavía ningún átomo estable de antimateria.

Capítulo 22

1. En atención a los lectores interesados en matemática recreativa, no puedo resistirme a añadir que Feynman es uno de los codescubridores de los hexaflexágonos, notables estructuras de papel plegado que cambian sus caras cuando son flexadas. (Véase el capítulo 1 de mi *Scientific American Book of Mathematical Puzzles and Diversions.*) Aunque un hexaflexágono parece simétrico, su estructura interior posee una «mano», es decir, un hexaflexágono dado puede ser construido a la derecha o a la izquierda.

2. Debo estos detalles sobre el símbolo Yin-Yang al excelente artículo de Schuyler Gamman sobre «El mágico cuadrado de tres en la antigua filosofía y religión china», *History of Religions,* vol. 1, verano de 1961, págs. 37-80.

Capítulo 23

"Cosmic Gall", por John Updike, en *Telephone Poles and Other Poems* (Knopf, 1963).

Capítulo 24

1. El concepto de Sr. Partido se remonta al famoso parlamento de Aristófanes sobre el amor en el *Symposium* de Platón. Los primeros seres humanos, dice el autor teatral griego, eran de forma esférica, con cuatro brazos, cuatro piernas y dos caras colocadas una frente a la otra en el cuello. Había tres sexos: dobles hombres, dobles mujeres, y macho y hembra reunidos en el mismo cuerpo. Como castigo por atreverse a atacar a los dioses, Zeus dividió a cada uno por la mitad del mismo modo que se corta una manzana. El amor es el deseo de los seres humanos divididos para volver a su doble forma originaria. Los heterosexuales son los descendientes del tipo macho-hembra, los homosexuales de los tipos todo-machos y todo-hembras. "Si continúan insolentándose —dice Zeus (y aquí emerge el Sr. Partido en la figuración)—, los dividiré otra vez y tendrán que saltar sobre una sola pierna."

Freud, en *Más allá del principio del placer,* encuentra un sólido elemento de verdad en el mito de Platón y señala que es más antiguo que Platón. Los *Upanishads* también atribuyen el origen del primer hombre y la primera mujer a una escisión derecha-izquierda de un ser originario. Muchos grandes teólogos cristianos, creyendo que el sexo es una consecuencia de la Caída, simpatizan con el mito platónico. Escribe Nikolai Berdiaef, el moderno teólogo ortodoxo griego, en su *Destino del hombre:* "El hombre es una criatura enferma, herida, inarmónica, en primer lugar a causa de que es un ser sexual, es decir, un ser dividido en dos que ha perdido su totalidad e integridad."

Una figura del esferoide de dos cabezas de Platón está descrita como adorno del sombrero de Gargantúa en el libro I, cap. 8 de *Gargantúa y Pantagruel* de Rabelais. En la maravillosa fantasía de Baum, *Sky Island* (Reilly & Britton, 1912), el perverso Boolooroo de los Azules castiga a sus súbditos por parejas por el diabólico método de cortar a las dos víctimas por la mitad, y después pegar el lado derecho de uno al lado izquierdo del otro.

2. La sugerencia de Kaluza y Klein de una quinta dimensión, apela a cualquier platónico que piense este mundo como la sombra y proyección de un espacio superior. Ya hemos mencionado en una nota anterior que el concepto de *cuarta* dimensión fue recogido por los primeros espiritistas. Desde la teoría de la relatividad, el "otro mundo" de muchos ocultistas ha sido la *quinta* dimensión de Kaluza y Klein. Para una discusión de la teoría de Kaluza-Klein y su papel en la rama Bennett del ocultismo, véase el apéndice sobre "Física de cinco dimensiones" en el primer volumen de la gruesa obra en tres de John Gudolphin Bennett *The Dynamic Universe* (Hodde-

rand Stoughton, 1956). Fue escrita antes de que Bennett se convirtiera al Subud, seguramente el más estrambótico de los recientes movimientos religiosos. En 1964, cuando escribí la teoría Kaluza-Klein (KK) en la primera edición de este libro, veía en ella poco más que una curiosidad fantasiosa. Me resultaba fascinante la utilización de una diminuta dimensión cerrada, una pequeña hiperesfera que rodeaba cada punto del espacio, para explicar por qué se anulan mutuamente las cargas positivas y negativas. En efecto, ésta fue la primera teoría de campo unificado, porque explicaba el electromagnetismo de manera parecida a la que Einstein empleó para explicar la gravedad, es decir, una curvatura que viaja en el espacio-tiempo. De alguna manera, reducía el electromagnetismo a la gravedad. Sabía también que la teoría había sido casi totalmente olvidada. Pregunté a varios físicos de primera fila, incluso a Eugene Wigner, qué opinaban sobre la teoría. La mayoría de ellos nunca habían oído hablar de ella, y los demás sólo la recordaban vagamente.

Se podrá imaginar, pues, cuál fue mi asombro cuando veinte años más tarde los físicos teóricos resucitaron repentinamente la vieja teoría KK. (Me pregunto a menudo si la lectura de mi libro influyó en ello.) Ahora es el tema de más rabiosa actualidad entre los que están elaborando teorías de supersimetría, o SUSYs, como a veces se llaman. La rotación de una partícula puede ser de cualquiera de los ocho tipos siguientes: rotaciones positivas 1/2, 1, 3/2, y 2, y rotaciones negativas de las mismas cuatro magnitudes. Resulta que una forma elegante de explicar dichas rotaciones es generalizar la teoría KK, dando a la pequeña hiperesfera más de cuatro dimensiones. La hiperesfera más sencilla que resuelve el problema es lo que los matemáticos llaman una esfera-7. (Al añadir el eje de tiempo se convierte en hipercilindro.) Si se confirma esta teoría, todas las fuerzas y partículas pasan a ser aspectos de una sola superfuerza que oscilan en un espacio tiempo de once dimensiones: las tres que conocemos, las siete dimensiones "comprimidas", y el tiempo. Uno de los grandes méritos de semejante teoría es que explica por qué las propiedades como carga y rotación son cuantificadas. Una cosa que se mueve alrededor de una hiperesfera ¡tiene que efectuar un número integral de viajes de ida y vuelta! Lo que observamos son, desde luego, proyecciones de estas trayectorias en el único espacio abierto a nuestra experiencia.

Unas palabras de cautela. Cuando los físicos hablan de espacios superiores a tres no se refieren necesariamente a espacios que están "ahí fuera" de la forma que nuestro espacio tridimensional (espacio-3) está "ahí fuera". Los espacios superiores pueden ser nada más que artefactos inventados para simplificar los cálculos. El espacio de configuración de la mecánica cuántica, por ejemplo, o el espacio Hibert de dimensiones infinitas, que se vale de un vector giratorio para representar el colapso de una función de onda, son ejemplos de espacios artificiales adoptados únicamente para facilitar los cálculos. Ningún físico cree que haya algo "ahí fuera", en un sistema cuántico, que parezca una flecha diminuta que gira cuando se mide el sistema, o que las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica estén por ahí de la forma que están ahí las ondas del agua y del sonido. Una curva trazada en una gráfica para esquematizar una función entre dos variables, normalmente no corresponde a ninguna línea curva en sentido físico. La curva "existe" solamente en el formalismo abstracto de la geometría analítica, representada por una línea primitiva dibujada sobre el papel.

Por otra parte, seguramente es posible que algunos de los espacios superiores de la física teórica, como los siete espacios invisibles de la teoría KK más popular, correspondan a una estructura que existe "por ahí" tanto como el espacio-3 habitual. Los entusiastas de la KK están divididos en lo que a este tema se refiere. Unos consideran las dimensiones adicionales como una realidad física, y otros solamente como herramientas matemáticas artificiales. Yo sospecho que a Einstein, si viviera hoy, ¡le sorprendería mucho más la vuelta a la teoría KK que la persistencia de la mecánica cuántica!

3. Véase el trabajo de Wigner "Invariancia relativista y fenómenos cuánticos", *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, núm. 3, julio 1957, páginas 255-278, y el de Landau "Sobre las leyes de conservación para las interacciones débiles", *Nuclear Physics*, vol. 3, 1957, págs. 127-131.

4. Aunque no es una opinión generalizada, algunos científicos han especulado en diversas publicaciones sobre la posibilidad de que la asimetría de las interacciones débiles origine lateralidad en aminoácidos primordiales. Por ejemplo, la radiación beta procedente de los radioisótopos naturales, al incidir sobre una mezcla racémica de aminoácidos "a izquierdas" y "a derechas", podría en cierto modo introducir un sesgo hacia la izquierda. Sea cual sea el mecanismo, si la asimetría de fuerzas básicas es la causa de la orientación biológica hacia la izquierda, entonces la vida "a izquierdas" debería extenderse por nuestra galaxia, quizá por el Universo entero. La vida "a derechas" sólo podría ser posible en un mundo antimatérico en el que las fuerzas fueran en dirección contraria.

Capítulo 26

1. Desde el punto de vista psíquico, el "ahora" no es el instante de que habla el físico, sino una región de límites imprecisos, de uno o dos segundos, durante los cuales el cerebro retiene una fuerte imagen de un

acontecimiento inmediato, como puede ser la imagen en la retina que da la ilusión de continuidad del movimiento en las películas de cine, o la capacidad de la mente para oír un acorde al ser tocadas varias notas en sucesión. Esta característica ha sido puesta de manifiesto por William James, Josiah Royce y otros muchos filósofos y psicólogos.

2. El enunciado clásico de esta posición, que es citado con frecuencia, se debe al matemático Hermann Weyl: "El mundo objetivo simplemente *es*, no *acontece*. Tan sólo al ser contemplada por mi consciencia, reptando hacia arriba a lo largo de la 'línea de vida' (la 'línea del mundo' de la teoría de la relatividad) de mi cuerpo, llega a cobrar vida una sección de este mundo, a modo de imagen fugaz en el espacio, que continuamente cambia en el tiempo."

Algunos filósofos han defendido esta tesis, que ha ejercido asimismo fuerte fascinación sobre unos pocos científicos. Su más vocinglero campeón de tiempos recientes ha sido Adolf Grünbaum. Grünbaum admite que el tiempo sea anisótropo en un sentido objetivo, pero arguye que el "llegar a ser", que comporta la noción de "ahora", es enteramente dependiente de la mente. Karl Popper, uno de los muchos filósofos de la ciencia con los que Grünbaum ha chocado en esta cuestión, ha expresado su estupefacción (que yo comparto) de que Grünbaum, firme defensor del realismo, repentinamente hable en términos idealistas al referirse a la flecha del tiempo. (Véase *The Philosophy of Karl Popper*, editada por P. A. Schilpp, página 1141.)

A mí me agrada pensar que en este punto la obstinación de Grünbaum es enteramente lingüística, y no un desacuerdo fundamental con filósofos realistas como Popper y Russell. Me parece que Grünbaum deja ver su juego cuando al final de su artículo sobre "El significado del tiempo", en *Basic Issues in the Philosophy of Time* (editado por E. Freeman y W. Sellars), escribe: "Pero al caracterizar el llegar a ser como algo dependiente de la psique, concedo plenamente que los acontecimientos mentales de que depende requieren a su vez una base material bioquímica, o posiblemente una base material que comporte *hardware* cibernético." Si eso es lo que Grünbaum cree, ¿por qué tantos melindres para usar el lenguaje del realismo?

Respuestas a los ejercicios

Capítulo 2

1. Las letras asimétricas son F, G, J, L, N, P, R, S, Z.

Capítulo 3

2. Un cubo tiene nueve planos de simetría. Tres son paralelos a pares de caras opuestas, seis pasan a través de aristas opuestas.

3. La "mano" derecha de los filetes de tornillos y tuercas refleja la dominancia de la mano derecha en la raza humana. Si usted tiene un destornillador en su mano derecha, puede ejercer una fuerza mayor de giro en el sentido de las manecillas del reloj que en sentido contrario, ya que pone en juego el potente músculo bíceps del brazo. Además, la base carnosa del pulgar derecho aplica una mayor resistencia friccional al mango de un destornillador cuando se le hace girar en el sentido de las agujas del reloj. (Debo al doctor Harvey P. Kopell, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, el haberme llamado la atención sobre ambos puntos.)

4. Todos los objetos, excepto la bola de jugar a los bolos, tienen una asimetría fundamental. La llave inglesa tiene un engranaje de rosca para abrir y cerrar sus mandíbulas. Algunas bolas de bolos con tres agujeros tienen una estructura simétrica. Desde luego, las de dos agujeros son simétricas.

Capítulo 4

5. Si usted vuelve la cabeza, verá "mud" en la pared detrás de usted. En la pared reflejada en el espejo usted leerá "bum".

6. Las caras superiores de los dados, de arriba a abajo, son 5, 3, 1.

Capítulo 10

7. Los hombres y las mujeres tienen la costumbre de abotonar únicamente sus *propios* abrigos. Al abotonar un abrigo cruzado de otra persona, un hombre es más probable que lleve la delantera en su mano izquierda sobre la delantera en su mano derecha, produciedo así una imagen especular de la manera en que se abotona a sí mismo el abrigo.

Capítulo 11

8. Cada uno de los cuatro triples ejes de simetría del cubo pasa a través de dos vértices opuestos.

9. El romboedro tiene tres planos de simetría; cada uno de ellos pasa a través de un par de aristas opuestas.

Capítulo 12

10. El modelo de la molécula de metanol tiene únicamente un plano de simetría, que pasa por los centros de la cereza y el malvavisco cortando la estructura por la mitad.

Capítulo 17

11. La palabra TUO, vista desde el otro lado de la puerta de cristal, es OUT (salida).

12. Sí; todas las superficies de una cara son no-orientables. Esto significa que una figura asimétrica sobre la superficie puede ser invertida de "mano" haciéndola resbalar de cierto modo por la superficie hasta volverla al punto de donde había partido.

Capítulo 19

13. El procedimiento no hace más que crear una barra imantada frente a uno con su polo norte a la derecha. Hasta que se le comunique la significación de derecha e izquierda, el habitante de Venus no sabría cuál es el extremo de la barra al que llamamos "norte".

Capítulo 20

14. No es posible poner todos los vasos boca arriba o todos invertidos. Al comenzar, un número impar de vasos están boca arriba. Si usted invierte dos que están boca abajo, aumenta el número de los que están boca arriba en dos, de modo que el número total de vasos boca arriba sigue siendo impar. Si usted invierte dos vasos con la boca arriba, usted disminuye el número de vasos boca arriba en dos, de modo que el total sigue siendo impar. Si usted invierte dos vasos que miran en direcciones opuestas, resta un vaso boca arriba y añade uno de la misma clase, y el número de esos vasos no cambia. Es, por tanto, imposible, invirtiendo a pares los vasos, cambiar el número de vasos boca arriba en un número par. Como son seis vasos, un número par, usted no puede nunca poner todos los vasos boca arriba. El mismo razonamiento prueba que no se pueden poner todos boca abajo.

Capítulo 21

15. La frase de que el doctor Teller y el doctor Anti-Teller se estrechan "las manos derechas" puede interpretarse de cuatro maneras:

1.° Cada uno extiende lo que *él* considera su mano derecha. (Una fotografía del hecho nos parecería como si el doctor Teller, con su mano derecha, estrechase la mano izquierda del doctor Anti-Teller.)

2.° Cada uno extiende lo que nosotros llamaríamos su mano derecha. En esta interpretación, el poema está escrito desde nuestro punto de vista.

3.° Cada uno extiende lo que, en una anti-tierra, sería una mano derecha. En esta interpretación, el poema está escrito desde un anti-punto de vista, haciendo de la explosión un anticlímax.

4.° Cada uno extiende su mano izquierda, que el otro considera una mano derecha. Ésta es la más forzada de las cuatro interpretaciones.

Capítulo 22

16. La observación del experimento tendría que incluir la observación de los detalles que indican la dirección de la corriente a través del alambre que se enrolla en torno al electroimán. Esta dirección, junto con la "mano" de la hélice del alambre, establecería qué polo del electroimán es

el que llamamos tradicionalmente sur. Si la mayoría de los electrones fueran emitidos desde el correspondiente extremo sur de los núcleos de cobalto, la película estaría sin trastocar. Si fueran emitidos desde el polo norte, esto demostraría que la película ha sido trastocada.

17. El análogo tridimensional del símbolo Yin-Yang es una pelota de béisbol. Es simétrica izquierda-derecha. Piet Hein, inventor y poeta danés, ha sugerido que un análogo mejor sería una superficie esférica dividida en *tres* regiones idénticas, con una pauta global de simetría. Imaginemos una cápsula cúbica hecha de un material elástico. Pintemos de rojo sus caras trasera e izquierda; de blanco la superior y la derecha; y de azul la frontal y la inferior. Inflémosla hasta convertirla en una esfera. Las tres regiones coloreadas siguen siendo congruentes, como el Yin y el Yang, y la disposición general es asimétrica. Piet Hein propone llamar a estas tres regiones Yin, Yang y Lee.



BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **El Universo desbocado.** *Del big bang a la catástrofe final.* Paul Davies
2. **Gorilas en la niebla.** *Trece años viviendo entre gorilas.* Dian Fossey
3. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
4. **Superfuerza.** Paul Davies
5. **Las raíces de la vida.** *Genes, células y evolución.* M. Hoagland
6. **Microelectrónica.** *Las computadoras y las nuevas tecnologías.* Stefan M. Gergely
7. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
8. **De los átomos a los quarks.** James S. Trefil
9. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
10. **¡Qué viene el cometa!** Nigel Calder
11. **Las plantas.** *«Amores y civilizaciones» vegetales.* Jean-Marie Pelt
12. **La frontera del infinito.** *De los agujeros negros a los confines del Universo.* Paul Davies
13. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
14. **Izquierda y derecha en el cosmos.** *Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo.* Martin Gardner
15. **Ecología humana.** *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."
— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."
— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS-Martin Gardner

SALVAT

MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."

— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."

— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS - Martin Gardner

SALVAT

MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."
— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."
— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS - Martin Gardner

SALVAT

MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

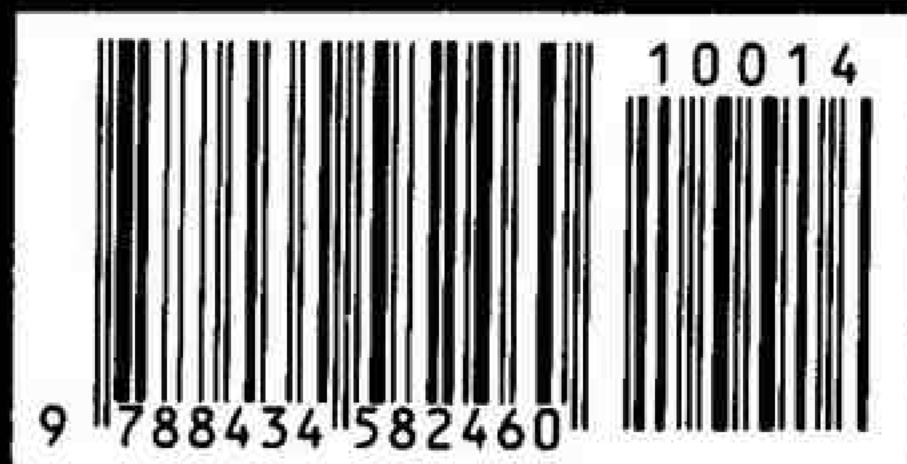
MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."
— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."
— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS-Martin Gardner

SALVAT

MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo

MARTIN GARDNER

Izquierda y derecha en el cosmos figura, por derechos propios, en las reducidas listas de libros "clásicos" de la ciencia. En esta última edición el autor incluye nuevos capítulos referentes a los últimos descubrimientos y especulaciones sobre la simetría y la asimetría en la ciencia, el arte y la vida cotidiana, prestando especial atención a la física de partículas y a la teoría de la inversión del tiempo.

"una idea muy clara de qué tratan la física y las matemáticas modernas... descrita con humor y elegancia."
— The New Yorker

"Seguramente fascinará a cualquier persona que tenga interés en saber la función que desempeña la simetría en el espacio y en el tiempo."
— The Physics Teacher

Martin Gardner es autor de numerosos artículos y libros. La mayor parte de sus publicaciones tratan de juegos matemáticos: Paradojas ¡Ajá! (Aha, gotcha!); Nuevos pasatiempos matemáticos (Martin Gardner's new mathematical diversions from Scientific American); Circo matemático (Mathematical circus). También destacan entre sus libros: La «explosión» de la relatividad (The relativity explosion); El increíble Dr. Matrix (The incredible Dr. Matrix)... algunas de estas obras aparecerán publicadas en esta colección. Martin Gardner fue el creador de la famosa columna «Juegos Matemáticos» de la revista Scientific American.



14

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS - Martin Gardner

SALVAT

MARTIN GARDNER

IZQUIERDA Y DERECHA EN EL COSMOS

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT